



الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
République Algérienne
Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي
والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

/...../...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Science et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energie Renouvelable en Electrotechnique

Thème

Optimisation d'un système autonome
(éolienne-photovoltaïque)

Présenté par :

BEN ALLA Ahmed

BEN YAHIA Mohamed Seddik

Soutenu publiquement le 10 /06/2024

Devant le jury composé de :

HAFSI Zoulikha	MCB	Université de Ghardaia	Président
BAHRI Ahmed	MCB	Université de Ghardaia	Encadrant
FERKOUS khaled	MCA	Université de Ghardaia	Examineur
OUSSAMA Moussa	MCB	Université de Ghardaia	Examineur

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

- * *Nous remercions tout d'abord **ALLAH** de nous donner la santé et la patience pour réaliser le travail imposé et pour avoir terminé ce mémoire.*
- * *Nous avons tout à exprimer nos profondes reconnaissances à monsieur **A.Bahri**, qui ont assuré la direction de ce travail afin de finaliser ce mémoire.*
- * *Nous remercions ainsi le **Dr HAFSI Zoulikha**, enseignante à l'université de Ghardaïa, d'avoir accepté de présider le jury. Nos vifs remerciements à Dr **Ferkous khaled & Oussama Moussa**, enseignants à l'université de Ghardaïa d'avoir accepté d'examiner ce travail.*
- * *Nous remercions ainsi **Mr. BOUCHAKOUR Abdelhak**, Maître de Recherche A à URAER Ghardaïa pour l'aide et la confiance qu'il nos accordés pour mener ce travail à terme.*
- * *Un très grand merci spécial à nos parents, et à nos familles.*
- * *Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

- *A mon père qu'est l'âme de ma vie et il restera toujours, que dieu la protège*
- *A ma chère mère (la voix de la sagesse et de l'amour), qui n'a jamais cessé de prier pour moi, que dieu la protège*
- *A mes chers frères et sœurs*
- *À mes neveux et nièces*
- *A tous ma famille et mes amis*
- *A tous mes collègues de la promo Energie renouvelable ELC*

B.Ahmed

Dédicace

*A mon père qu'est l'âme de ma vie et il restera
toujours, que dieu la protège*

*A ma chère mère (la voix de la sagesse et de
l'amour), qui n'a jamais cessé de prier pour
moi, que dieu la protège*

À ma chère grand-mère, que Dieu ait son âme

A mes chers frères et sœurs

*A tous mes collègues de la promo Energie
renouvelable ELC*

A tous ma famille et mes amis

*Je remercie mon cher collègue et compagnon de
parcours pour son soutien constant et sa
collaboration continue dans la réalisation de ce
mémoire.*

B.MSeddik

Résumé

Cette mémoire aborde le sujet d'un système hybride photovoltaïque/éolien connecté avec une batterie est conçu pour maximiser l'efficacité énergétique en combinant deux sources renouvelables de production d'électricité. Le système utilise à la fois des panneaux solaires et des éoliennes pour capter l'énergie naturelle du soleil et du vent. Cette énergie est convertie en électricité et stockée dans une batterie pour une utilisation ultérieure.

Ce travail concentre sur le développement d'une méthode pour contrôler la tension du bus à courant continu (CC) dans un système hybride de conversion d'énergie multi-sources (SCEM). Ce système intègre plusieurs sources d'énergie renouvelable. La méthode proposée utilise des convertisseurs (Hacheur, Onduleur) pour gérer et stabiliser efficacement la tension du bus CC, assurant ainsi une intégration optimale des différentes sources d'énergie renouvelable pour alimenter une charge variable.

L'optimisation de ce système repose sur plusieurs aspects :

1. Gestion de la production : Un algorithme est mis en place pour optimiser la production d'énergie en fonction des conditions météorologiques changeantes. Les algorithmes de contrôle ajustent la répartition de la charge entre les panneaux solaires et les éoliennes pour maximiser la production totale d'énergie.
2. Stockage efficace de l'énergie : La batterie joue un rôle crucial dans le système en stockant l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de forte production. Cette énergie stockée est ensuite utilisée pour alimenter les charges lorsque la production d'énergie est faible ou nulle, assurant ainsi une alimentation continue.
3. Gestion de la charge variable : Le système est conçu pour alimenter une charge variable, ce qui signifie qu'il doit s'adapter aux fluctuations de la demande énergétique. Cela nécessite une planification minutieuse pour dimensionner correctement le système et garantir une alimentation stable même lorsque la demande varie.

En combinant ces éléments, l'optimisation d'un système hybride photovoltaïque/éolien avec batterie permet de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables, de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et fournit une source d'électricité stable et durable.

Mots clés : système multi-source, convertisseur, photovoltaïque, éolienne, banc batterie. DC bus.

Abstract

This thesis addresses the subject of a hybrid photovoltaic/wind system connected with a battery is designed to maximize energy efficiency by combining two renewable sources of electricity production. The system uses both solar panels and wind turbines to capture natural energy from the sun and wind. This energy is converted into electricity and stored in a battery for later use.

This work focuses on developing a method to control direct current (DC) bus voltage in a hybrid multi-source power conversion (SCEM) system. This system integrates several renewable energy sources. The proposed method uses converters (Chopper, Inverter) to efficiently manage and stabilize the (DC) bus voltage, thus ensuring optimal integration of different renewable energy sources to power a variable load.

The optimization of this system is based on several aspects:

- 1- Production management: An algorithm is implemented to optimize energy production based on changing weather conditions. Control algorithms adjust the load distribution between solar panels and wind turbines to maximize total energy production.
- 2- Efficient energy storage: The battery plays a crucial role in the system by storing excess energy produced during peak production periods. This stored energy is then used to power loads when there is little or no energy production, ensuring continuous power.
- 3- Variable load management: The system is designed to supply a variable load, which means it must adapt to fluctuations in energy demand. This requires careful planning to properly size the system and ensure stable power even when demand varies.

By combining these elements, the optimization of a hybrid photovoltaic/wind system with battery makes it possible to maximize the use of renewable energies, reduce dependence on fossil fuels and provides a stable and sustainable source of electricity.

Keywords: multi-source system, photovoltaic, wind, battery bank. DC bus voltage.

ملخص

تتناول هذه المذكرة موضوع نظام هجين لنظام يتكون من ألواح كهروضوئية/تربينة الرياح متصل ببطارية مصمم لتحقيق استخراج أقصى قيمة من الطاقة من خلال الجمع بين مصدرين متجددين لإنتاج الكهرباء. يستخدم نظام الألواح الشمسية وتوربينات الرياح لالتقاط الطاقة الطبيعية من الشمس والرياح. ويتم تحويل هذه الطاقة إلى كهرباء وتخزينها في بطارية لاستخدامها لاحقاً. يركز هذا العمل على تطوير طريقة للتحكم في جهد ناقل التيار المستمر (DC) في نظام تحويل الطاقة الهجين متعدد المصادر (SCEM) يدمج هذا النظام العديد من مصادر الطاقة المتجددة. تستخدم الطريقة المقترحة المحولات (محول الجهد و المحول العاكس) لتسيير وتنشيط جهد ناقل التيار المستمر بكفاءة، وبالتالي ضمان التكامل الأمثل بين مصادر الطاقة المتجددة المختلفة لتشغيل حمل متغير.

يعتمد تحسين هذا النظام على عدة جوانب.

- 1- تسيير الإنتاج: يتم تطبيق خوارزمية لتحسين إنتاج الطاقة بناءً على الظروف الجوية المتغيرة. تقوم خوارزميات التحكم بضبط توزيع الحمل بين الألواح الشمسية وتوربينات الرياح لاستخراج أقصى طاقة ممكنة.
- 2- تخزين الطاقة بكفاءة: تلعب البطارية دوراً حاسماً في النظام من خلال تخزين الطاقة الزائدة المنتجة خلال فترات ذروة الإنتاج. يتم بعد ذلك استخدام هذه الطاقة المخزنة لتشغيل الأحمال عندما يكون إنتاج الطاقة ضئيلاً أو معدوماً، مما يضمن استمرارية الطاقة
- 3- تسيير الأحمال المتغيرة: تم تصميم النظام لتوفير حمل متغير، مما يعني أنه يجب أن يتكيف مع التقلبات في الطلب على الطاقة. ويتطلب ذلك تخطيطاً دقيقاً لتحديد حجم النظام بشكل صحيح وضمان استقرار الطاقة حتى عندما يختلف الطلب ومن خلال الجمع بين هذه العناصر، يؤدي تحسين نظام البطاريات الكهروضوئية/طاقة الرياح الهجين إلى زيادة استخدام الطاقة المتجددة إلى أقصى حد، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتوفير مصدر مستقر ومستدام للكهرباء.

الكلمات المفتاحية: نظام متعدد المصادر، الكهروضوئية، الرياح، بنك البطاريات. وصلة جهد مستمر.

Table des matières

Remerciements I
Dédicace.....II
Résumé IV
Abstract V
ملخص..... VI
Table des matières..... VII
Liste des figures..... XI
Liste des tableauxXIV
Liste des abréviations.....XVI
Liste des acronymesXVIII
Introduction générale 1

Chapitre I : Etat de l’art des systèmes hybrides à énergie renouvelables

I.1. Introduction.....3
I.2. Production mondiale d’électricité3
I.3. Situation énergétique en Algérie4
I.4. Production d’énergie renouvelable en Algérie5
I.5. Systèmes hybrides8
I.5.1. Définition7
I.5.2. Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie ?7
I.6. Importance de l’hybridation.....8
I.7. Classification des systèmes hybrides.....9
I.7.1. Régime du fonctionnement.....9
I.7.2. Structure du système hybride9
I.7.3. Etudes des systèmes hybrides..... 11
I.8. Combinaisons de SHER..... 11
I.8.1. Architecture à bus DC 12
I.8.2. Architecture à bus AC 13
I.8.3. Architecture mixte (DC&AC)..... 14

I.9. Présentation du SEH : PV/Eolien/Banc de batteries	15
I.10. Les Systèmes de stockage	16
I.11. Système de supervision	16
I.12. Conclusion	16

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1.Introduction	22
II.2.L'effet photovoltaïque	22
II.3.Principe de la conversion photovoltaïque	23
II.4.Types d'un système solaire photovoltaïque	24
II.4.1.Système autonome	24
II.4.2.Système autonome avec batterie.....	24
II.4.3.Systèmes PV connectés au réseau.....	25
II.4.4.Système hybride	25
II.5.Cellule photovoltaïque	26
II.5.1.Technologies des cellules photovoltaïques	27
II.5.2.Technologie de la 1ère génération : cellules cristallines	27
II.5.3.Technologie de la 2ème génération : couches minces "thin-films" :.....	28
II.5.4.Technologie de 3ème génération : multi jonction, concentration	28
II.6.Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque	29
II.7.Influence des paramètres sur la caractéristique I(V) & P(V).....	30
II.7.1.Influence de l'éclairement.....	30
II.7.2.Influence de la température.....	32
II.8.Modélisation des convertisseurs statiques.....	33
II.8.1.Convertisseurs DC-DC	33
II.8.1.1.Convertisseur DC/DC : (Hacheurs).....	33
II.8.1.2.Types des convertisseurs DC-DC.....	34
II.8.2.Onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC	37
II.8.2.1Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux	38
II.9.Commande MPPT	40
II.9.1.Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT).....	40
II.9.2.Principe de fonctionnement MPPT	41
II.9.3.Types d'algorithme de MPPT :.....	42
II.10.Description d'un système hybride PV/ Banc de Batteries.	45

II.11.Modélisation de la deuxième chaine conversion.....	46
II.12.Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel	47
II.13.Commande de la deuxième chaine conversion.....	48
II.14.Contrôle de la tension du Bus continu V_{dc}	49
II.15.Conclusion.....	51

Chapitre III : Modélisation du système éolien

III.1.Introduction.....	56
III.2.Historique	56
III.3.Définition de l'énergie éolienne	58
III.4.Principaux composants d'une éolienne.....	58
III.5.Différent type du l'éolien.....	60
III.6.Le principe de fonctionnement d'une éolienne	62
III.7.Application des éoliennes	63
III.7.1.Les systèmes isolés	63
III.7.2.Systèmes hybrides	63
III.7.3.Systèmes reliés au réseau	63
III.8.Les avantages et les inconvénients d'éolienne	64
III.9.Protection contre la corrosion.....	65
III.10.Modélisation du système éolienne	65
III.10.1.Modèle de la turbine éolienne.	65
III.10.2.Modèle de l'arbre.	68
III.10.3..Modèle de la machine synchrone à aimants permanents.	69
III.11.Redresseur triphasé à diodes.....	71
III.12.Modélisation du bus continu	74
III.13.Algorithme MPPT pour le système éolien.	75
III.14.Conclusion	79

Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats

IV.1. Introduction	84
IV.2. Simulation et discussion des résultats	85
IV.3. Conclusion	97
Conclusion générale.....	99

Listes des figures

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides à énergie renouvelables

Fig I.1 Production mondiale nette d'électricité, 2007-2035 [1]	5
Fig I.2 Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie en 2012	6
Fig I.3 Production d'énergie renouvelable en Algérie	8
Fig I.4 Classification des systèmes hybrides [5].....	11
Fig I.5 Système hybride à énergies renouvelables [7].....	12
Fig I.6 Structure à bus DC d'un système hybride.....	13
Fig I.7 Structure à bus AC d'un système hybride	14
Fig I.8 Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride.....	15
Fig I.9 Schéma global du système hybride proposé.	15

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

Fig II.1.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	24
Fig II.2.Système autonome avec batterie	25
Fig II.3.Exemple d'un système PV hybride.	26
Fig II.4.Crystalline cells, (a) mono-crystalline, (b) poly-crystalline[8]	27
Fig II.5Cellule à couche mince.....	28
Fig II.6.Multi-junction and concentration cells, (a) concentration, (b) organic, (c) multilayer.....	29
Fig II.7.Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.....	30
Fig II.8.Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)	31
Fig II.9.L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).	31
Fig II.10.L'influence de la température sur la caractéristique I(V)	32
Fig II.11.L'influence de la température sur la caractéristique P(V).....	33
Fig II.12.Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur).....	34
Fig II.13.Convertisseur boost	36
Fig II.14.Onduleur triphasé à trois niveaux NPC	38
Fig II.15.Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC	39
Fig II.16.Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT[3].....	41
Fig II.17.Caractéristiques I(V), P(V) et trajectoire du point de puissance maximale[20].....	42
Fig II.18.Schéma synoptique de l'association photovoltaïque avec MPPT	42

Fig II.19. Caractéristique <i>PPV</i> (<i>VPV</i>)	44
Fig II.20. Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (<i>P&O</i>) [11]	44
Fig II.21. Structure du système hybride PV/Banc de Batteries	46
Fig II.22. Schéma électrique du convertisseur DC/DC bidirectionnel.....	47
Fig II.23. Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel.....	48
Fig II.24. Schéma bloc d'un régulateur PID.	49

Chapitre III : Modélisation du système éolien

Fig III.1. Photographie de deux moulins à vent	57
Fig III.2. Constitution d'une éolienne.....	59
Fig III.3. Constitution de la nacelle	60
Fig III.4. Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.	61
Fig III.5. Structure d'un système éolien à vitesse variable à base d'une machine GSAP.	65
Fig III.6. Schéma de la turbine éolienne	66
Fig III.7. Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique.....	67
Fig III.8. Schéma bloc du modèle de la turbine.	69
Fig III.9. Schéma équivalent du GSAP et le diagramme vectoriel associé.	70
Fig III.10. Pont redresseur de diode triphasé.....	73
Fig III.11. Allure de la tension redressée.	73
Fig III.12. Modèle du bus continu.	75
Fig III.13. Structure de contrôle d'une turbine éolienne	77
Fig III.14. Circuit de contrôle de l'hacheur élévateur.....	79

Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats

Fig IV.1. Variations d'irradiance	88
Fig IV.2. Eolienne à vitesse variable	88
Fig IV.3. Charge électrique.....	88
Fig IV.4. Liaison V_{dc} , V_{dc1} et V_{dc2}	89
Fig IV.5. Puissances du système d'énergie hybride.....	89
Fig IV.6 .Batterie SOC	90
Fig IV.7 .Courant de la batterie.....	90
Fig IV.8. Tension de la batterie	91
Fig IV.9 .Courant et tension du panneau solaire photovoltaïque	91

Fig IV.10. Tension de sortie de l'éolienne.....	92
Fig IV.11. Courant de sortie de l'éolienne.....	92
Fig IV.12. Vitesse du rotor.....	93
Fig IV.13. Vitesse spécifique	93
Fig IV.14. Coefficient de puissance CP	94
Fig IV.15. Tension de sortie de la charge	94
Fig IV.16. Zoom de la tension de sortie	95
Fig IV.17. Harmoniques de la tension sinusoïdale.....	95
Fig IV.18. Courant de sortie de la charge	96
Fig IV.19. Zoom courant de sortie	96
Fig IV.20. Harmoniques du courant sinusoïdal.....	96

Listes des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides à énergie renouvelables

Tab I.1. Capacités de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables[4]5

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

Tab II.1. Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques[9].....29

Tab II.2. Type des convertisseurs35

Tab II.3. Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes48

Chapitre IV : Simulation et duscussion des résultats

Tab IV.1. Paramètres du tableau PV Array86

Tab IV.2. Paramètres de la batterie.....86

Tab IV.3. Paramètres du générateur éolien86

Tab IV.4. Paramètres MSAP87

Listes des abréviations

AC : Alternative Curent
BB : Banc de batteries.
SHER : Système hybride en énergie renouvelable .
BBC : Banc de batteries control
BBDC : Buck-boost bidirectionnel Converter.
DC : Direct Curent
DCC : Deuxième chaine de conversion.
DG : Générateurs diesel.
ER : Energie renouvelable.
GAS : Générateurs asynchrones.
GPV : Générateurs photovoltaïques.
GSAP : Générateur synchrone à aimant permanent.
MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion
MOSFET : Metal Oxide Semi-conducteur Field Effect Transistor.
MPPT : Maximum Power Point Tracking
MSAP : Machine Synchrone à Aimants Permanents
MSE: Mean Squared Error
NPC: Neutral Point Clamped.
P&O : Perturbation et observation.
PAC : Pile à combustible.
PCC : Première chaine de conversion.
PI : Proportionnelle-Intégrale
PID : Proportionnelle-Intégrale-Dérivée.
PPM : Point de puissance maximale
PV : Photovoltaïques.
SCEM : Système de conversion d'énergie multi sources.
SEH : Système d'énergie hybride.

SOC : State of Charge

SS : Système de stockage.

SVM : Space Vector Modulation.

TCC : Troisième chaine de conversion.

THD: Total harmonic distortion

Liste des acronymes

A (V) : Tension exponentielle

A : Coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.

A_c : Le potentiel thermique.

B (Ah^{-1}) : Capacité exponentielle.

B (deg) : L'angle d'inclinaison des pâles de la turbine.

C_{aer} (N.m) : Couple aérodynamique.

C_{em} (N.m) : Couple électromagnétique.

C_G (N.m) : Couple du multiplicateur

$C_{méc}$ (N.m) : Couple mécanique

C_p : Coefficient de la puissance.

E (V) : Tension non linéaire de la batterie.

E, E_{ref} (W/m^2) : Eclairement réel et éclairement dans les conditions normales

E_0 (V) : Tension constante de la batterie.

G : Gain du multiplicateur.

I^* (A) : Dynamique du courant a basse fréquence.

I_0 (A) : Courant de saturation de la diode.

$I_1, I_2 ; I_3$ (A) : Courants alternatifs de l'onduleur.

I_{Batt} (A) : Courant de batterie.

I_{cc} (A) : Courant de court-circuit.

$I_{d1}, I_{d2} ; I_{d0}$ (A) : Courants s continues d'entrée de l'onduleur.

I_{mp} (A) : Courant au point de puissance maximale.

I_{sat} (A) : Courant de saturation.

I_{sr} (A) : Courant de saturation réversible.

it (Ah) : Capacité extraite.

J_t : l'inertie de la turbine.

- k (Ah-1): Constante de polarisation.
- K (J/K.) : Constant de Boltzmann = $1.3806503 \times 10^{-23}$
- m : L'indice de modulation.
- P_{aer} : Puissance aérodynamique disponible sur l'arbre de la turbine.
- P_{in} (W) : Puissance incidente.
- P_{max} (W) : Puissance maximale.
- P_v (kg/m³): Puissance de la masse d'air.
- Q (Ah): Capacité maximale de la batterie.
- q (C): Charge électrique élémentaire 1.607×10^{-19}
- R (m) : Rayon de la turbine.
- r : Coefficient de réglage en tension
- R_{in} (Ω): Résistance série interne de batterie.
- R_P (Ω) Résistance parallèle
- R_s (Ω): Résistance Série.
- T : Temps de charge ou de décharge.
- $T(K^\circ)$: Température de la cellule
- T_{ref} : Température dans les conditions normale en kelvin ($T_{ref} = 298$ K)
- V (m/s): Vitesse du vent
- V_{ABC} (V): Tension des nœuds de l'onduleur.
- V_{AM} (V) : Tension simple d'onduleur.
- V_{Batt} (V): Tension de la batterie.
- V_{c1} (V): Tension demi bras supérieur.
- V_{c2} (V): Tension demi bras inférieur.
- V_{co} (V) : tension du circuit ouvert.
- V_{dc} (V) : Tension du bus DC.
- V_{dc*} (V) : Tension désirée du bus DC.
- $V_{dc-simu}$ (V) : Tension du Bus DC de sortie.
- V_e (V): Tension d'entrée du boost.

V_{mp} (V): Tension au point de puissance maximale.

V_{ref} (V): Tensions de référence.

V_s (V) : Tension de sortie du boost.

α : Rapport cyclique variable.

λ : Vitesse spécifique.

ω_e : Vitesse angulaire électrique.

Ω_t (rad/s): Vitesse de rotation de la turbine.

P_{VI} (A): Courant de la sortie de la cellule ou le GPV.

P_I (A): Courant traversant la résistance parallèle.

P_{hi} (A) : Photo courant ou le courant généré par l'éclairement.

d_v (V) : Tension aux bornes de la diode.

T_s (S): Période d'échantillonnage de l'onduleur.

V_s^* : Vecteur tension de référence.

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte de transition énergétique mondiale et de lutte contre le changement climatique, les systèmes énergétiques autonomes intégrant des générateurs photovoltaïques (GPV), des batteries de stockage (BB) et des éoliennes jouent un rôle crucial. Ces systèmes hybrides permettent de capter et d'utiliser les énergies renouvelables de manière optimale, garantissant une production d'énergie fiable et durable même en l'absence de connexion au réseau électrique conventionnel.

L'optimisation de ces systèmes repose sur la nécessité d'équilibrer plusieurs aspects essentiels. Le dimensionnement adéquat des composants (GPV, éoliennes et batteries) est crucial pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques et maximiser l'efficacité globale. Une gestion intelligente de l'énergie, via des systèmes de gestion de l'énergie (EMS), permet de réguler le flux d'énergie entre les différentes sources et le stockage, assurant ainsi une distribution continue et minimisant les pertes.

Les prédictions météorologiques et les modèles de production énergétique sont également indispensables pour planifier efficacement l'utilisation des ressources renouvelables disponibles. En parallèle, l'optimisation des stratégies de charge et de décharge des batteries améliore leur durée de vie et la rentabilité économique du système.

Ainsi, l'optimisation des systèmes autonomes combinant GPV, BB et éoliennes offre une solution innovante et durable aux défis énergétiques contemporains, contribuant à un avenir énergétique plus vert et plus résilient.

Le contenu de cette mémoire est structuré en quatre chapitres représentés comme suit :

- Le premier chapitre présente l'état de l'art sur le développement des énergies renouvelables, telles que l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne aussi l'option d'hybridation.
- Le deuxième chapitre traite la modélisation dynamique du système photovoltaïque, le système de stockage et les convertisseurs statiques (Hacheur Boost, Hacheur Buck-Boost, et Onduleur). La partie commande de ce chapitre nous réalise deux conditions. La première est

de maintenir la tension globale du bus DC constante. La deuxième est de garantir un état de charge du banc des batteries (SOC) dans l'intervalle choisit. Pour nous permettre de réaliser ses deux conditions, nous avons introduit une boucle de régulation à base d'un régulateur PID.

- Le troisième chapitre présente la description globale de notre deuxième source renouvelable tel que le système éolien, la modélisation de la turbine éolienne ainsi que la génératrice synchrone à aimant permanent sera détaillée, est dans le but d'extraire la puissance maximale de l'énergie du vent à tout moment, la commande MPPT du système de conversion éolien sera présentée.
- Le quatrième chapitre présente résultats et simulation du système hybride. Ce dernier contient deux (02) sources principales (générateur photovoltaïque et éolienne) et une source auxiliaire (batterie).

Nous clôturons cette mémoire par une conclusion générale et les éventuelles perspectives.

Chapitre I :

Etat de l'art des systèmes hybride à énergie renouvelables

I.1. Introduction.

Un système hybride de production électrique est un système qui produit de l'électricité à partir de deux sources d'énergie (ou davantage) utilisées conjointement. Il inclut souvent, mais pas nécessairement, une unité de stockage et est raccordé à un réseau de distribution local ou un mini-réseau pour assurer la continuité de puissance.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter un bref aperçu des systèmes hybrides. Par la suite, nous aborderons la classification ainsi que les différentes architectures des systèmes multi-sources. Ensuite, les principales composantes des systèmes multi-sources, composés d'un générateur photovoltaïque, d'une génératrice éolienne et d'un banc de batteries solaires, seront montrées. Nous terminerons ce chapitre en exposant l'état des lieux ainsi que le programme visé par l'Algérie pour la réalisation et le développement des énergies renouvelables.[1] [2]

I.2. Production mondiale d'électricité.

Figure I.1 illustre que la production d'électricité repose encore largement sur des sources d'énergie traditionnelles, qui seront éventuellement épuisées. Cette situation rend l'avenir particulièrement fragile, car la demande en combustibles fossiles devrait bientôt dépasser la capacité de production même des plus grands fournisseurs. De plus, la production d'énergie nucléaire, autrefois considérée comme une source d'énergie illimitée, est aujourd'hui très impopulaire et suscite des inquiétudes. Par ailleurs, le recours aux technologies conventionnelles pour la production d'électricité a eu de graves répercussions sur l'environnement au fil des décennies. Ainsi, le monde entier est désormais confronté au défi de réduire l'impact négatif de la production d'énergie sur notre planète et de trouver des moyens de produire la quantité nécessaire d'énergie à partir de sources propres[3].

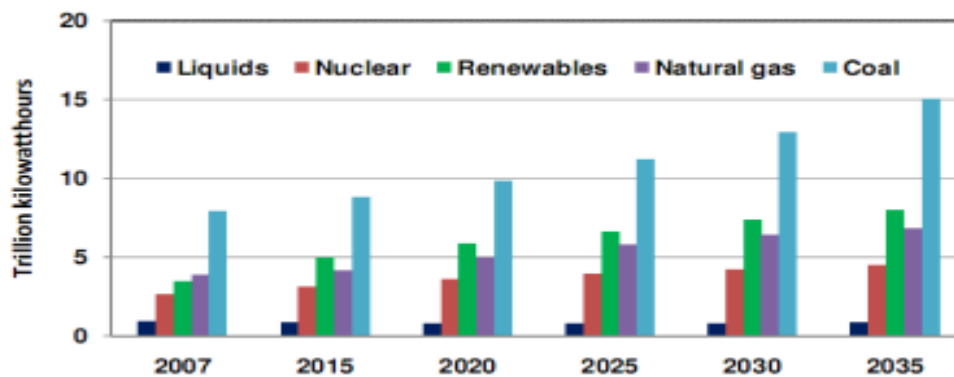


Fig I.1. Production mondiale nette d'électricité, 2007-2035 [1]

Ainsi, Le rapport annuel "Statistiques de capacité renouvelable 2020" de l'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA) fournit un résumé de l'évolution des capacités cumulées de production d'électricité à partir des principales ressources renouvelables dans le monde pour la période 2015-2019. Le Tableau I.1 présente les données pour chaque filière renouvelable, telles que l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité, la biomasse, etc. [4]

Tab I.1 Capacités de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables [4]

Source renouvelable primaire	2015	2016	2017	2018	2019
Hydro-électricité	1099	1129	1156	1177	1189
Eolien (On et Offshore)	416	467	514	564	623
Solaire (CSP + PV)	222	296	389	489	586
Biomasse	97	105	111	117	124
Géothermie	12	12	13	14	15
Total	1846	2009	2183	2361	2537

I.3. Situation énergétique en Algérie.

En Algérie, en 2022, 98% de la production totale d'électricité, soit 57,2 TWh, provenait des combustibles fossiles, principalement du gaz naturel, qui est l'énergie la plus abondante. Seulement 2% provenait des énergies renouvelables, dont 0,3% était issu de la production hydraulique et 1,7% de la filière solaire photovoltaïque. La répartition de ces ressources sur la production d'électricité en Algérie est illustrée dans le graphique ci-dessous.

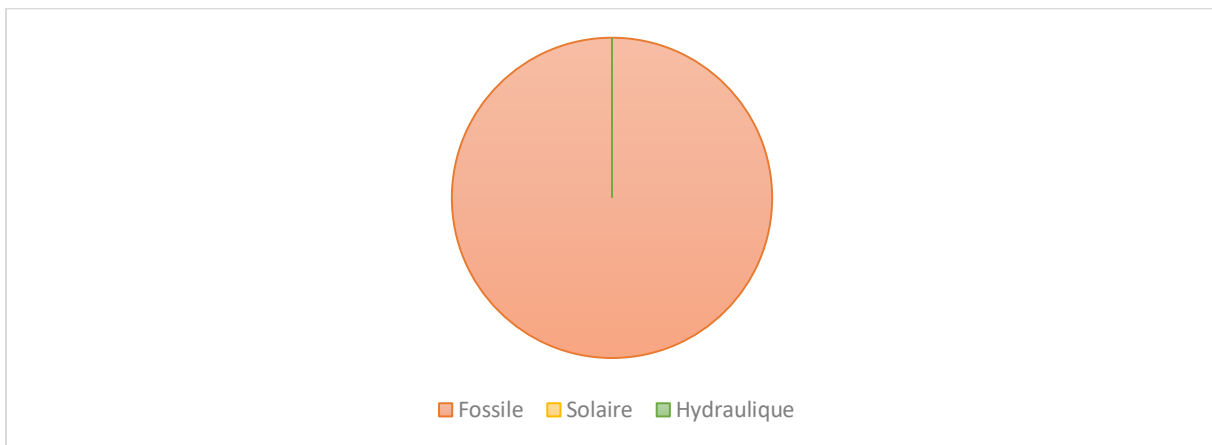


Fig I.2. Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie en 2022

I.4. Production d'énergie renouvelable en Algérie.

La production d'énergie renouvelable en Algérie est un objectif majeur du Programme algérien pour le développement des énergies renouvelables (PNEREE) de 2012.

L'Algérie vise à atteindre une capacité installée en énergie renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030, avec 12 000 MW destinés à répondre à la demande nationale et 10 000 MW pour les exportations. En 2015, l'Algérie a annoncé l'installation de 270 MWc d'énergie solaire, portant sa production totale à 300 MWc. Le pays s'est également fixé des objectifs ambitieux pour diverses sources d'énergie renouvelable, notamment 13 575 MWc de photovoltaïque solaire, 5 010 MWc d'énergie éolienne, 2 000 MWc de thermodynamique solaire (CSP), 1 000 MWc de biomasse, 400 MWc de cogénération et 15 MWc d'énergie géothermique d'ici 2030. [4] Ces initiatives visent à faire en sorte que l'énergie renouvelable représente 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité pour la consommation nationale d'ici 2030. Le groupe Sonelgaz, acteur

majeur dans le secteur de l'énergie en Algérie, a investi dans des projets novateurs et durables, incluant la construction de 67 centrales solaires, comprenant des centrales photovoltaïques, hybrides, solaires thermiques et éoliennes, dans le cadre de son programme de développement des énergies renouvelables.

Le nouveau programme spécifie les objectifs d'installation d'ici 2030 :

- 3 575 MWc de photovoltaïque solaire.
- 5 010 MWc d'énergie éolienne.
- 2 000 MWc de thermodynamique solaire (CSP).
- 1 000 MWc de biomasse (récupération des déchets).
- 400 MWc de cogénération.
- 15 MWc d'énergie géothermique.

Dans le cadre du Programme algérien pour l'énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) de 2012, l'Algérie vise à atteindre une capacité installée en énergie renouvelable de 22 GW d'ici 2030, avec plus de 4,5 GW nécessaires d'ici 2020. L'objectif est que l'énergie renouvelable représente 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité pour la consommation nationale. Le groupe Sonelgaz, acteur clé du secteur de l'énergie en Algérie, investit dans des sources d'énergie novatrices et renouvelables. Dans le cadre de son programme de énergies renouvelables, Sonelgaz prévoit la construction de 67 projets de centrales solaires, comprenant 27 centrales photovoltaïques, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes [6].

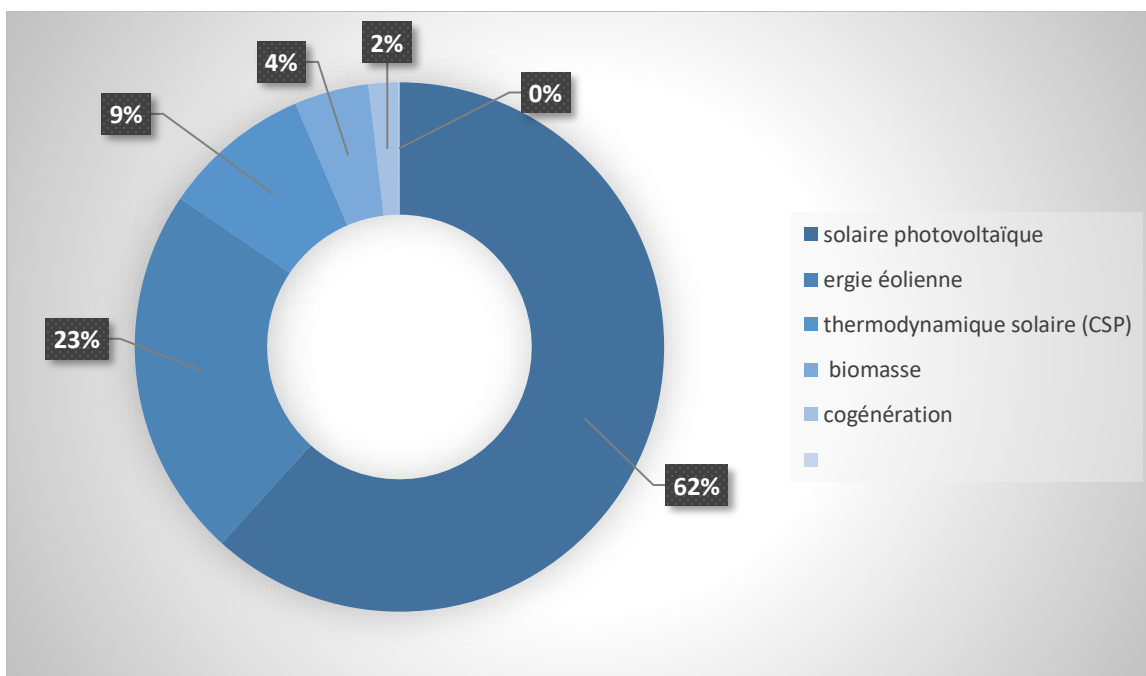


Fig I.3. Production d'énergie renouvelable en Algérie[6]

I.5. Systèmes hybrides.

I.5.1 Définition.

Le problème de la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables peut être résolu en couplant différentes sources d'approvisionnement pour former un système hybride. Un système hybride à source d'énergie renouvelable est un système électrique qui intègre plusieurs sources d'énergie, dont au moins un est renouvelable. Ce système peut également inclure un dispositif de stockage. À une échelle plus large, le système énergétique d'un pays peut être envisagé comme un système hybride.[5][6]

I.5.2 Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie ?

De manière générale, les systèmes énergétiques hybrides sont des systèmes combinant différentes sources de production d'énergie. Par exemple, un système hybride éolien-diesel est un exemple de système énergétique hybride. Selon une source, les systèmes énergétiques hybrides actuels combinent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles, généralement des générateurs diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable. Ces systèmes énergétiques hybrides fonctionnent de manière autonome grâce à de grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des zones reculées. Les systèmes

hybrides d'énergies renouvelables sont fiables, non polluants et peuvent répondre aux besoins énergétiques sur le long terme.[7][8]

I.6. Importance de l'hybridation.

Aujourd'hui, il est devenu essentiel pour les chercheurs de regarder au-delà des combustibles fossiles et de fission pour trouver des sources d'énergie propres et renouvelables. Ces sources comprennent l'énergie solaire, éolienne, géothermique, la biomasse et l'énergie océanique. Contrairement aux sources d'énergie traditionnelles, ces sources d'énergie propres et durables sont bonnes pour l'environnement. Cependant, en raison de leur caractère aléatoire, leur disponibilité varie en fonction du moment de la journée, de la saison et de l'année. Pour surmonter cette variabilité, les chercheurs se tournent vers les hybrides, une combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables.[8]

Cette approche permet d'assurer une disponibilité accrue et un approvisionnement constant en énergie pour les charges. Le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski souligne que l'hybridation de plusieurs sources d'énergie, en particulier les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production de l'électricité, tant sur le plan technique qu'économique [7].

L'hybridation des sources d'énergies renouvelables présente un intérêt considérable en raison de leur flexibilité inégalée, de leur souplesse de fonctionnement et de leur coût attractif.

De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie.
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

Les solutions d'hybridation des sources d'énergies renouvelables exigent un dimensionnement préalable laborieux, basé sur une connaissance approfondie du potentiel en énergies renouvelables du site d'implantation. De plus, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite est nécessaire en aval. Cette gestion efficace repose sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle.[9][7][8]

I.7. Classification des systèmes hybrides.

Il existe différentes classifications des systèmes hybrides en fonction des critères choisis. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les classifications les plus couramment utilisées.

- **Régime du fonctionnement.**

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on retrouve les systèmes hybrides connectés au réseau électrique, travaillant en parallèle avec celui-ci.[3] Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière, etc.[3][5][9][10]

- **Structure du système hybride.**

La structure du système hybride peut être classée en fonction de trois critères :

- **Le premier critère :** est la présence ou l'absence d'une source d'énergie conventionnelle. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, voire une centrale électrique complète dans le cas d'une étude du réseau électrique global.
- **Le deuxième critère possible :** Un autre critère à prendre en compte est la présence ou l'absence d'un dispositif de stockage. La présence d'un système de stockage permet d'assurer une meilleure gestion de l'énergie en stockant l'électricité produite pour une utilisation ultérieure, notamment pendant les périodes où la source d'énergie primaire n'est pas disponible. Les dispositifs de stockage couramment utilisés incluent les batteries rechargeables, les électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, les volants d'inertie, etc.
- **Le troisième critère possible :** Une autre classification possible concerne les types de sources d'énergie renouvelables utilisées. La configuration du système peut inclure un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrale hydroélectrique ou exploitation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Le choix de la source d'énergie dépend en grande partie du potentiel énergétique disponible, qui varie en fonction de l'emplacement du système hybride. Un autre facteur crucial à prendre en compte est le profil de consommation électrique du site alimenté, car cela peut influencer le besoin d'une source

d'énergie supplémentaire, d'un dispositif de stockage ou même d'une source conventionnelle.[11][12]

- **Etudes des systèmes hybrides.**

Compte tenu de ces nombreux critères, il est facile d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe.

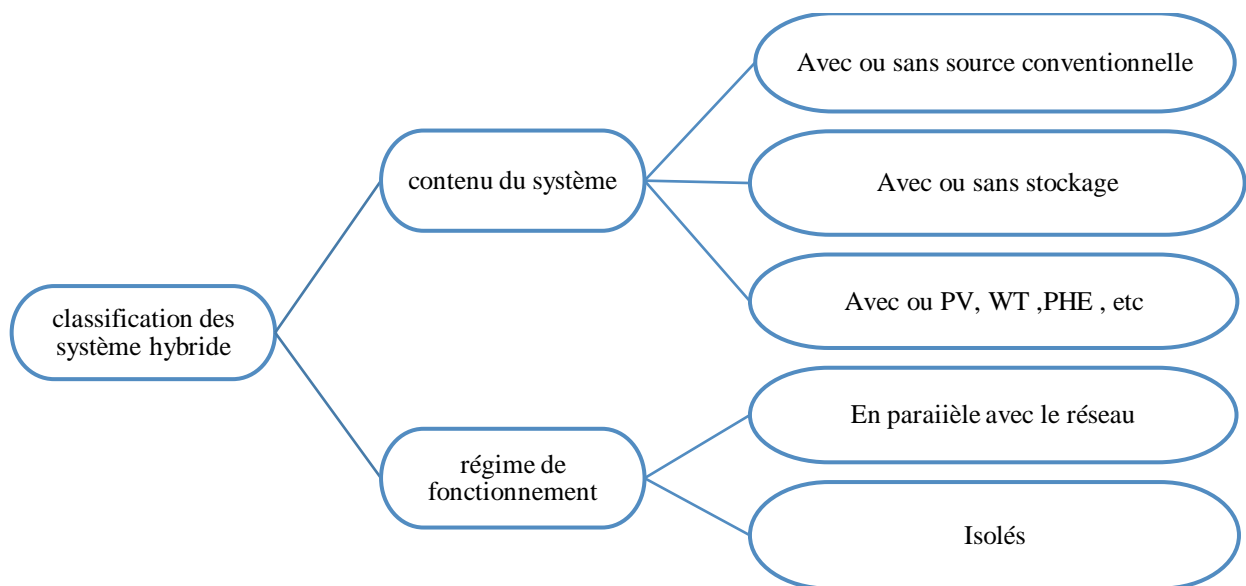


Fig I.4. Classification des systèmes hybrides [5]

I.8. Combinaisons de SHER.

Les systèmes hybrides d'énergie renouvelable se présentent sous diverses configurations. L'électronique de puissance joue un rôle essentiel dans ces systèmes (voir Figure I.5). De plus, des dispositifs de stockage tels que des batteries et des piles à combustible à hydrogène sont souvent intégrés pour assurer une gestion efficace de l'énergie générée.[7]

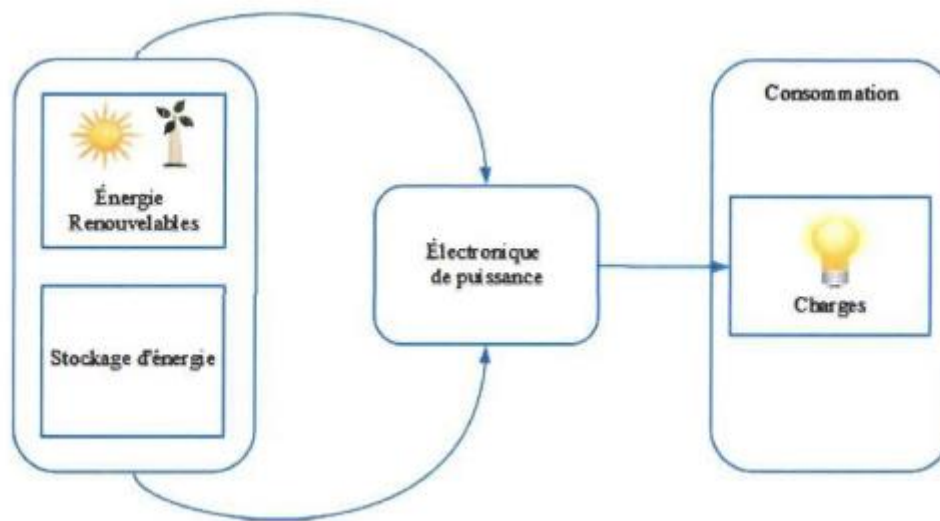


Fig I.5. Système hybride à énergies renouvelables [7]

Un système hybride à énergies renouvelables est une combinaison de plusieurs technologies d'énergies renouvelables telles que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les petites turbines hydroélectriques, etc. [7] Il intègre également des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage. Trois architectures principales sont couramment utilisées pour les systèmes hybrides à énergies renouvelables :

- L'architecture à bus DC
- L'architecture à bus AC
- L'architecture mixte à bus DC-AC.

I.8.1 Architecture à bus DC.

La structure à bus DC d'un système hybride est illustrée dans la figure I.6. Dans cette configuration, chaque source d'énergie du système alimente un bus continu DC à l'aide de convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce schéma est particulièrement adapté pour les sites isolés, qu'ils soient à charge continue ou alternative, et connectés au bus DC via un onduleur. L'un des principaux avantages de cette topologie est sa simplicité de commande par rapport à d'autres configurations [13].

L'un des points forts de cette architecture est sa simplicité, ce qui facilite la gestion du système. Cependant, le rendement global de l'ensemble est réduit en raison des pertes d'énergie dues aux batteries et aux convertisseurs[13][14][15].

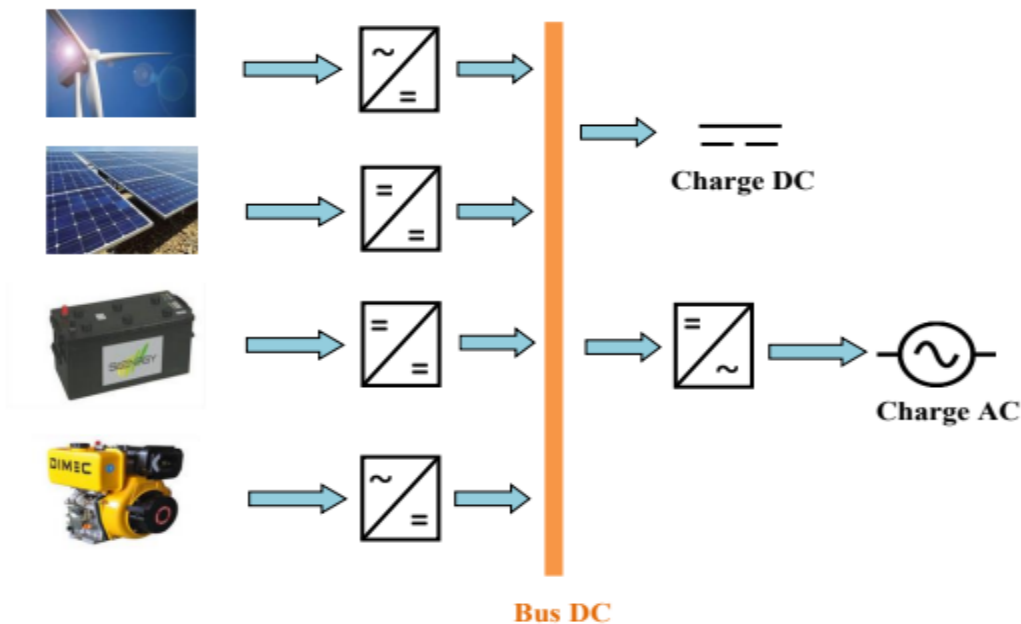


Fig I.6. Structure à bus DC d'un système hybride

I.8.2 Architecture à bus AC.

Dans la topologie à bus AC, toutes les sources de production sont connectées au bus AC via des convertisseurs, comme illustré dans la figure I.7. Ce schéma présente des performances améliorées par rapport à la configuration antérieure, car il permet un découplage des différentes sources de production, favorisant ainsi leur indépendance. [9] Cependant, l'efficacité globale du système est réduite en raison des pertes d'énergie engendrées par l'utilisation des convertisseurs statiques. De plus, ce type d'association complexifie le système de commande. L'architecture à bus AC est mieux adaptée à une génération distribuée, c'est-à-dire connectée au réseau électrique.[16][7]

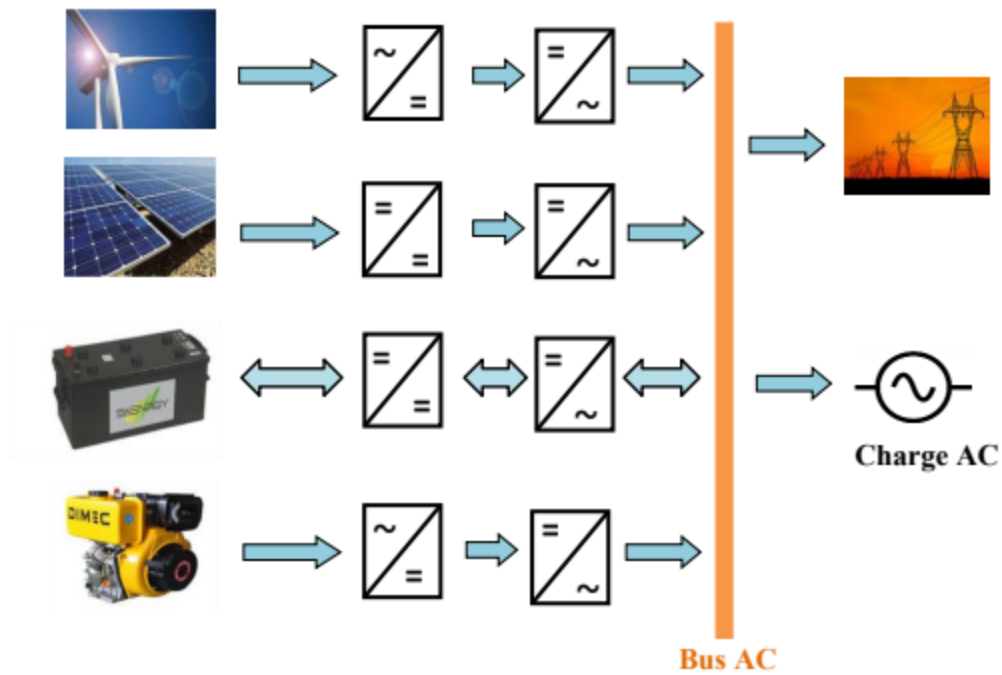


Fig I.7. Structure à bus AC d'un système hybride

I.8.3 Architecture mixte (DC&AC).

La figure I.8 illustre la configuration d'un système hybride à bus mixte (DC&AC). Dans ce schéma, les différentes sources d'énergie peuvent fournir de l'électricité à la fois à une charge alternative AC et à une charge continue DC grâce à un convertisseur bidirectionnel capable de convertir entre le courant continu et alternatif, et inversement.[13][17][18]

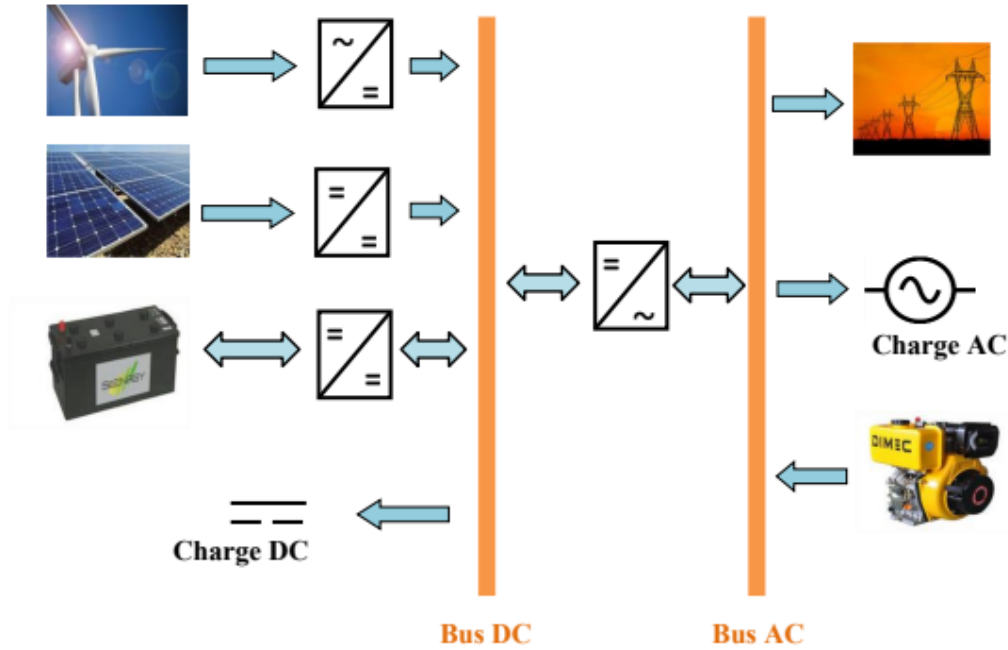


Fig I.8. Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride

I.9. Présentation du SEH : PV/Eolien/Banc de batteries.

La figure I.9 décrit la configuration du système hybride proposé dans cette étude, qui se compose des systèmes photovoltaïque, éolien et de stockage par batterie. Ces éléments travaillent ensemble pour fournir de l'électricité à une charge principale, qui est une charge alternative AC. [19][20]

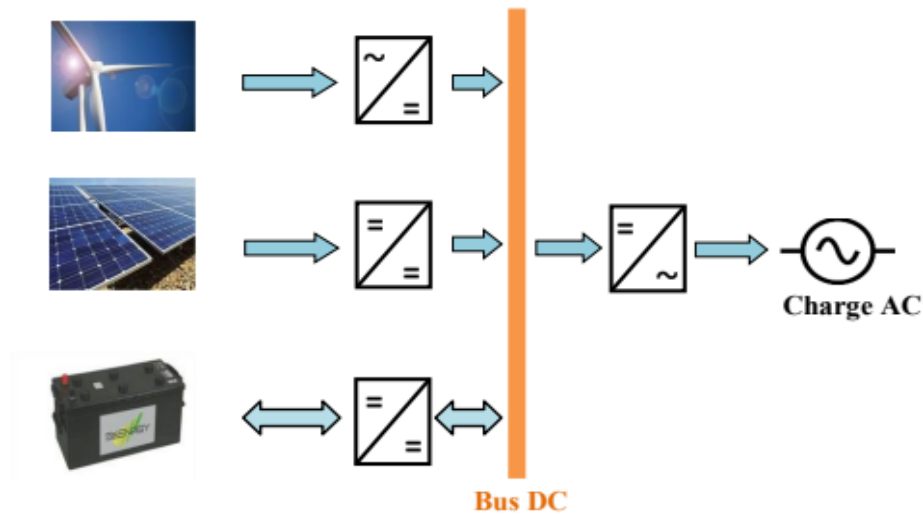


Fig I.9. Schéma global du système hybride proposé.

I.10. Les Systèmes de stockage

Dans un système hybride en site isolé ou pour une utilisation autonome, le stockage d'énergie (banque de batteries) joue un rôle essentiel. Dans la majorité des situations, le stockage à l'aide de batteries est la méthode la plus abordable. Les batteries utilisées le plus fréquemment sont celles au plomb-acide. Cette technologie présente des coûts assez abordables par rapport à d'autres technologies et une expérience ancienne, étant la technologie de stockage d'énergie la plus ancienne [9][21]

Il est crucial de stocker de l'énergie lorsque la demande en énergie ne correspond pas à la disponibilité de l'énergie externe. Il offre la possibilité de satisfaire les exigences de charge sur une durée prolongée, allant d'un jour à plusieurs semaines. Puisque les ressources renouvelables varient, il est nécessaire que les accumulateurs soient performants. doivent être capables de supporter de nombreux cycles de charge et de décharge sans dommage. La profondeur de décharge à laquelle une batterie est soumise dépend de son type. La durée de vie des batteries est fortement influencée par l'état de charge, le nombre de cycles de charge/décharge, la température, les phénomènes de corrosion, les conditions d'utilisation, etc.[22]

I.11. Système de supervision.

Pour contrôler un système hybride, il est nécessaire d'utiliser un système de surveillance. Celui-ci possède une intelligence qui lui permet de gérer de manière efficace les interactions entre les divers éléments d'un système hybride. Il joue le rôle central dans le système hybride, prenant des décisions concernant l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries, générateur diesel) en fonction de la demande de charge et de la disponibilité des énergies renouvelables.[23][24]

La littérature propose différentes stratégies de gestion et de supervision afin de faire face aux diverses problématiques des systèmes multi-sources. L'objectif de ces stratégies est d'améliorer l'exploitation des diverses sources d'énergie disponibles, de s'assurer de la fiabilité du système et de réduire au minimum les dépenses d'exploitation.

I.12. Conclusion.

Ce chapitre offre une vue d'ensemble de la production d'énergie à l'échelle mondiale et internationale. Dans un premier temps, nous avons souligné l'importance de l'utilisation d'un système de production d'énergie multi-sources. Par la suite, on a exposé les classifications et les diverses architectures des systèmes multi-sources. Les principaux éléments du système multi-

sources, qui seront abordés dans les chapitres deux et trois, sont étudiés, à savoir le générateur photovoltaïque, le générateur éolien et le banc de batteries solaires. Enfin, nous avons présenté l'état actuel de l'énergie en Algérie ainsi que le programme visant à mettre en place et à développer les énergies renouvelables.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation de l'une des architectures du système multi-sources et des convertisseurs dans la chaîne de conversion photovoltaïque.

Références

- [1] A. Borni and R. Chenni, "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique." Université frères Mentouri-Constantine 1, 2015.
- [2] J. Labbé, "L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés." École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [3] A. M. M. Yasin, "Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Structures." Università di Catania, 2012.
- [4] B. Benlahbib, "Supervision d'un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique." thèse de doctorat, université de Houari Boumediene, 2019.
- [5] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables." Université Pascal Paoli, 2011.
- [6] T. Zhou, "Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau." Ecole centrale de Lille, 2009.
- [7] A. K. Traoré, "Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles." Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [8] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés: rapport interne," Unv-Québec, 2008.
- [9] I. Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome." Université du Havre, 2005.
- [10] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique." Arts et Métiers ParisTech, 2008.
- [11] M. Ashari, C. V Nayar, and W. W. L. Keerthipala, "Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply," *Renew. energy*, vol. 22, no. 1-3, pp. 247-254, 2001.

- [12] C. Wang, Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems. Montana State University, 2006.
- [13] M. Ashari and C. V Nayar, "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system," *Sol. energy*, vol. 66, no. 1, pp. 1–9, 1999.
- [14] B. Madaci, R. Chenni, and K. E. Hemsas, "Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs." Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2018.
- [15] B. Berbaoui, R. Dehini, and M. Hatti, "An applied methodology for optimal sizing and placement of hybrid power source in remote area of South Algeria," *Renew. energy*, vol. 146, pp. 2785–2796, 2020.
- [16] G. Bekele and G. Tadesse, "Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia," *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 5–15, 2012.
- [17] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, no. 11, pp. 5708–5718, 2007.
- [18] B. Wichert, "PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation—a review of current practice and future developments," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 1, no. 3, pp. 209–228, 1997.
- [19] M. Muselli, G. Notton, and A. Louche, "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management," *Sol. energy*, vol. 65, no. 3, pp. 143–157, 1999.
- [20] B. AHMED, "Optimisation d'un système de production d'énergie multi-sources," Université de 20 Août 1955-Telemcen, 2022.
- [21] M. BENCHERIF, "Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension." Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2014.
- [22] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien

avec stockage hybride batteries/supercondensateurs.” Université de Poitiers, 2013.

[23] J. Lagorce, “Modelisation, dimensionnement et optimisation des systemes d'alimentation decentralises Ã energie renouvelable-application des systemes multi-agents pour la gestion de l'energie.” Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.

[24] Z. Liao and X. Ruan, “A novel power management control strategy for stand-alone photovoltaic power system,” in 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IEEE, 2009, pp. 445–449.

CHAPITRE II :

Modélisation du système photovoltaïque

II.1. Introduction

Le soleil est une source d'énergie presque infinie, capable de répondre à nos besoins énergétiques mondiaux plusieurs milliers de fois. Grâce à la technologie des cellules photovoltaïques, nous avons réussi à exploiter cette source, sujet abordé dans ce chapitre.

Nous commencerons par la modélisation de la source photovoltaïque renouvelable. Ensuite, nous étudierons le convertisseur Boost (DC) et nous le simulerons pour vérifier la validité de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) conçu.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de cette énergie et améliorer son utilisation, nous avons rappelé brièvement les performances des générateurs solaires photovoltaïques, puis nous avons modélisé ce dernier avec un banc de batteries solaires (PV/BB) ainsi qu'un convertisseur Buck-Boost qui relie notre deuxième source à la bus DC. Le contrôle de ce dernier permet de remplir deux conditions : maintenir la tension globale de la bus DC constante et garantir que l'état de charge (SOC) du banc de batteries reste dans la plage spécifiée. Pour réaliser ces deux conditions, nous avons introduit une boucle de régulation basée sur un régulateur PID pour optimiser le contrôle de la charge et de la décharge du banc de batteries.

Dans ce contexte, nous avons utilisé l'outil informatique Matlab/Simulink, qui permet à chaque instant de déterminer le fonctionnement des différents éléments constituant le système énergétique.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de cette énergie et d'optimiser son utilisation, ce chapitre propose un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, ainsi que sur les performances des cellules photovoltaïques et des générateurs solaires photovoltaïques.

II.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque consiste à convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant des cellules majoritairement en silicium. Afin de générer une puissance adéquate, ces cellules sont reliées entre elles afin de créer un module solaire. La production directe d'électricité à partir de la lumière est un effet observé pour la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Mais ce n'est qu'au milieu des années 1950 que les scientifiques des

laboratoires Bell, aux États-Unis, ont réussi à concevoir la première cellule photovoltaïque, qui constitue l'élément fondamental d'un système photovoltaïque. [1]

II.3. Principe de la conversion photovoltaïque

Les cellules solaires reposent sur les caractéristiques des semi-conducteurs. Quand les photons de la lumière solaire touchent la surface d'une cellule photovoltaïque, ils transmettent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur, habituellement du silicium. Les électrons sont libérés lors de ce transfert d'énergie, ce qui forme des paires électron-trou.

Les électrons libérés se déplacent de manière aléatoire à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Cependant, pour générer un courant électrique utile, il est nécessaire de les obliger à se déplacer dans une direction spécifique. Pour ce faire, la cellule solaire est constituée de deux couches de silicium, dopées de manière distincte.

Des atomes comme le phosphore donnent des électrons supplémentaires à la couche supérieure. La charge de cette région devient donc négative (N). D'autre part, la couche inférieure contient des atomes tels que le bore, ce qui entraîne un manque d'électrons et une charge positive (P).

La différence de charges entre les deux couches crée un champ électrique à travers la cellule. Lorsque les électrons excités par les photons se déplacent, ils sont repoussés par ce champ électrique et forcés de migrer vers la couche N, tandis que les trous (ou lacunes d'électrons) se déplacent vers la couche P.

Les électrons se déplacent ensuite le long d'un circuit externe connecté aux contacts métalliques situés sur les côtés de la cellule, produisant ainsi un courant électrique utilisable. Ce courant continu peut ensuite être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure. En résumé, les cellules photovoltaïques transforment la lumière solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque dans un matériau semi-conducteur[1][2].

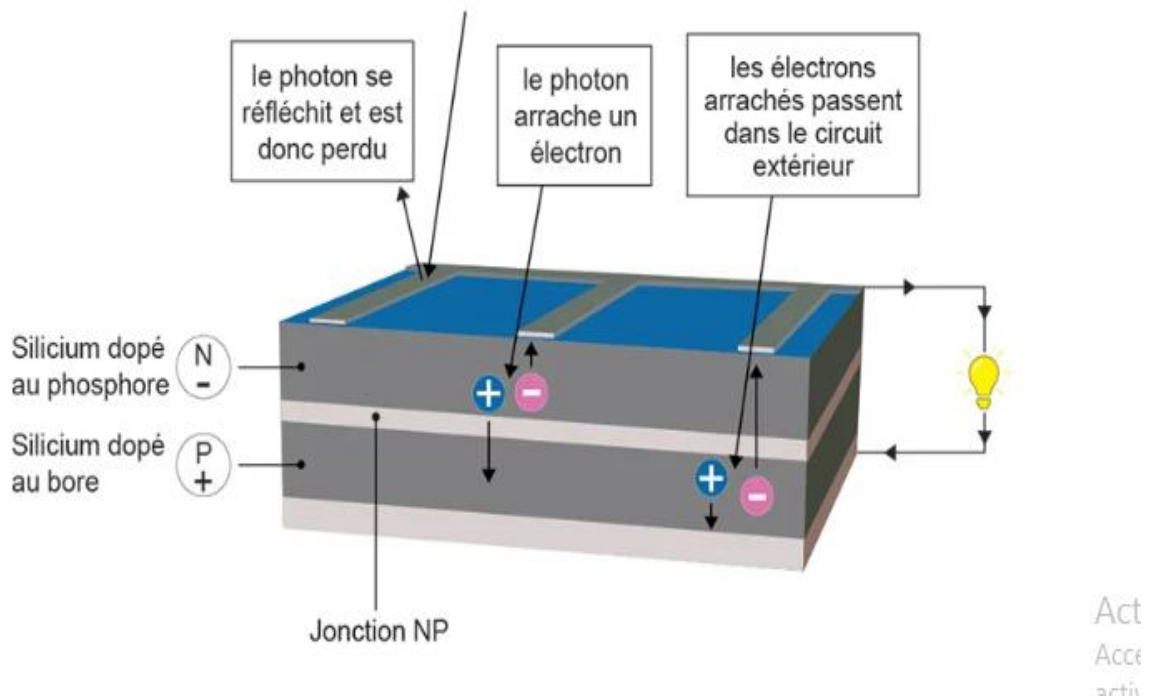


Fig II.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

II.4. Types d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.[3]

II.4.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. [4]

II.4.2. Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).[4]

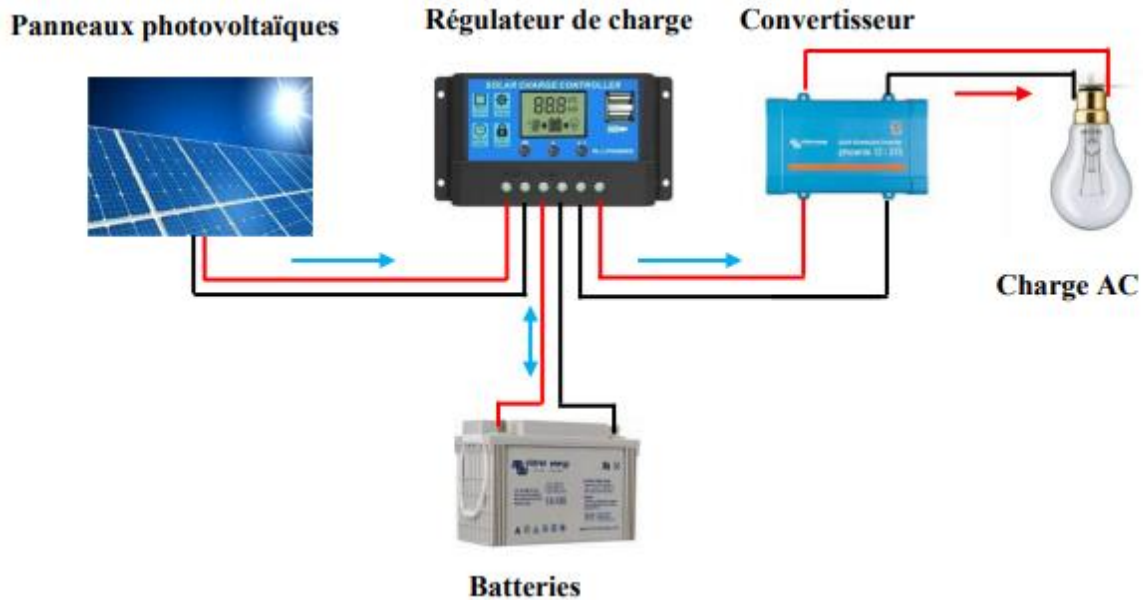


Fig II.2. Système autonome avec batterie

II.4.3. Systèmes PV connectés au réseau

Ce type de système est généralement installé à un endroit relié au réseau Sonelgaz en Algérie. On le trouve couramment dans les propriétés résidentielles ou commerciales qui souhaitent utiliser des énergies renouvelables et avoir accès à un ensoleillement suffisant. Lorsqu'un système photovoltaïque est connecté au réseau, il n'est pas nécessaire de stocker l'énergie, supprimant ainsi le composant le plus complexe et le plus coûteux. En réalité, l'ensemble du réseau fonctionne comme un réservoir d'énergie.

L'injection de courant photovoltaïque peut se faire de deux manières :

- Soit en injectant dans le réseau la totalité de la production d'énergie photovoltaïque,
- Soit en injectant uniquement dans le réseau l'excédent d'énergie produit par le système photovoltaïque.[5]

II.4.4. Système hybride

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de

l'électricité à tout moment, où les coûts de transport décarburant sont élevés où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle.[6][7].

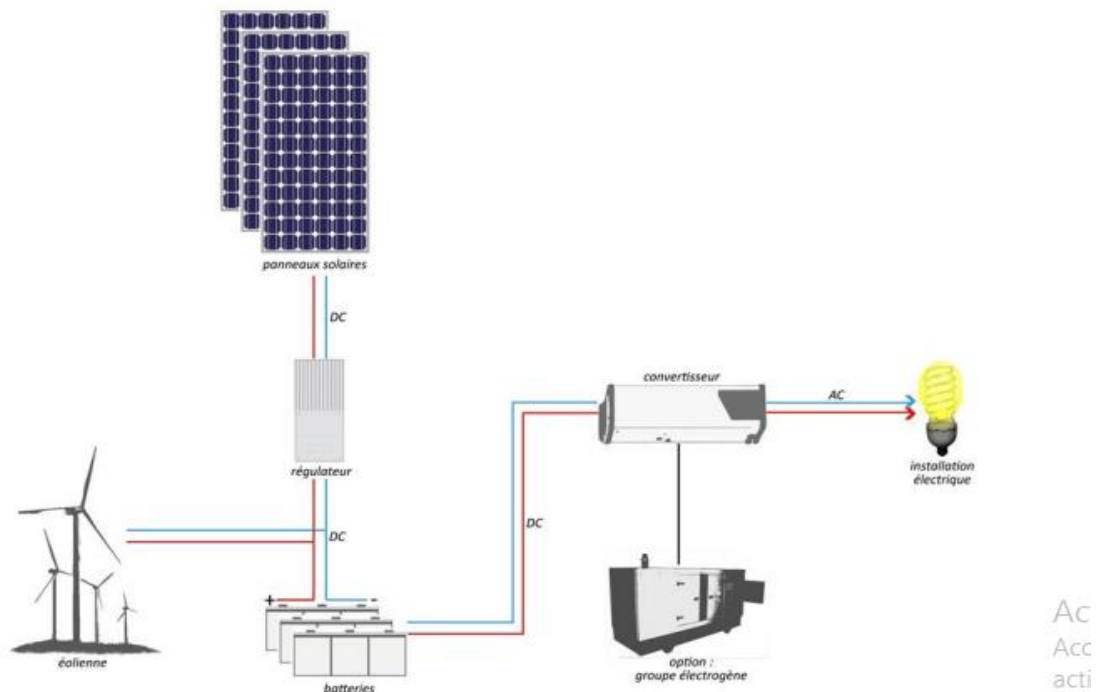


Fig II.3. Exemple d'un système PV hybride.

II.5. Cellule photovoltaïque

La cellule solaire ou photovoltaïque est considérée comme l'élément essentiel de la conversion photovoltaïque. E. Becquerel l'a découverte en 1839. Elles sont obtenues en utilisant des matériaux semi-conducteurs, c'est-à-dire qui présentent des caractéristiques intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière, une force électromotrice se manifeste. La tension produite varie de 0,3 V à 0,7 V selon le matériau utilisé, sa configuration, la température de la cellule et le processus de vieillissement de celle-ci. [8]

II.5.1. Technologies des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être conçue en utilisant divers semi-conducteurs. Actuellement, il existe principalement trois types de cellules solaires selon leur procédé de fabrication : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques [8].

II.5.2. Technologie de la 1ère génération : cellules cristallines

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur.

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.[8]

- Les cellules en **silicium monocristallin** se composent d'un seul cristal divisé en deux couches. Elles affichent les rendements les plus élevés, variant de 16% à 24%, mais leur prix est aussi le plus élevé parmi les différentes technologies de cellules solaires.
-
- Les cellules en **silicium poly-cristallin**, aussi connues sous le nom de multi cristallines, sont formées d'un assemblage de cristaux. Leur efficacité se situe généralement entre 15% et 18%. Cette technologie a joué un rôle significatif dans la réduction des coûts des modules solaires.

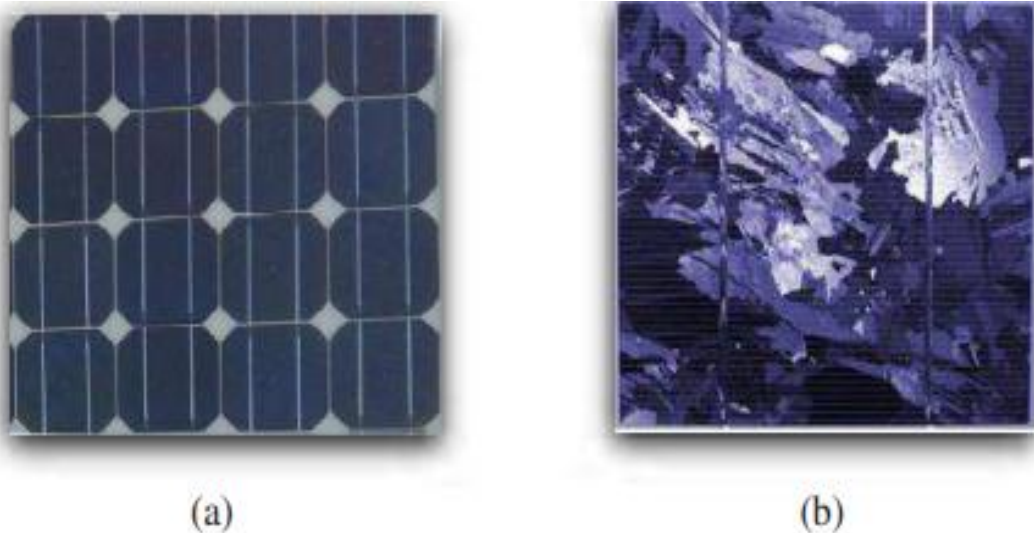


Fig II.4. Crystalline cells, (a) mono-crystalline, (b) poly-crystalline[8]

II.5.3. Technologie de la 2ème génération : couches minces "thin-films" :

Il existe plusieurs types de cellules à couches minces, notamment :

- Le tellure de Cadmium (CdTe)
- Le silicium amorphe (a-si)
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).



Fig II.5. Cellule à couche mince

Les cellules à couches minces présentent un coût inférieur à celui des cellules cristallines, bien que leur rendement soit généralement plus faible, oscillant entre 7% et 11%. Elles fonctionnent efficacement même en cas de faible luminosité et capturent bien le rayonnement diffus. Par conséquent, elles sont moins sensibles aux variations du rayonnement direct, ce qui en fait une alternative attrayante aux cellules cristallines dans les environnements sujets à des ombrages importants.[8]

II.5.4. Technologie de 3ème génération : multi jonction, concentration

Elles sont élaborées à partir des molécules organiques qui possèdent à la fois la flexibilité et la légèreté. Ces cellules se déclinent en trois types :

- **Cellules à multiples couches** : superposition de plusieurs cellules ayant des propriétés distinctes (utilisant différentes bandes d'énergie pour une capture étendue du spectre solaire).
- **Cellules concentratrices** : permettant l'utilisation de photons à faible énergie qui ne sont généralement pas absorbés par la cellule. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (environ 40 %).

- **Cellules organiques** : ce sont des cellules photovoltaïques dans lesquelles au moins la couche active est constituée de molécules organiques. On distingue principalement les cellules photovoltaïques organiques et celles composées de polymères moléculaires.[8]

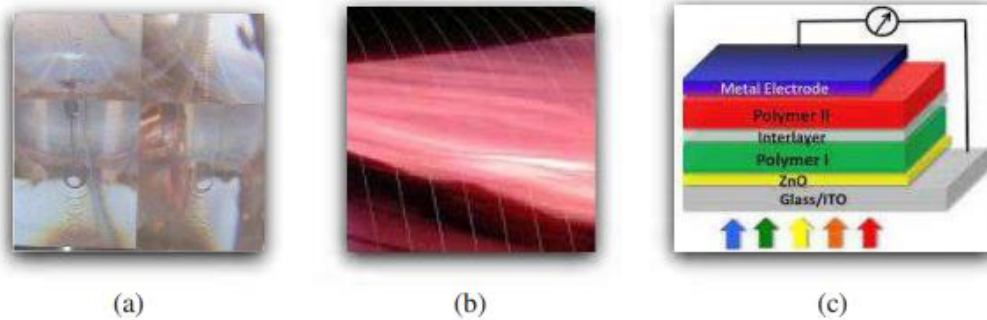


Fig II.6. Multi-junction and concentration cells, (a) concentration, (b) organic, (c) multilayer

Tab II.1. Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques[9]

Type de cellule	Avantage	Inconvénient
Silicium monocristalline	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
Silicium Polycristallin	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
Silicium Amorphe	Facile à fabriquer	Mauvais rendement
CdTe	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant
CIGS	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première
Cellules Organiques	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas

II.6. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque, ou PVG, se compose d'un certain nombre de cellules connectées en parallèle et en série les unes avec les autres pour fournir la tension et le courant souhaités[10][11]

Fig.II.7 montre le circuit électrique d'une cellule photovoltaïque.

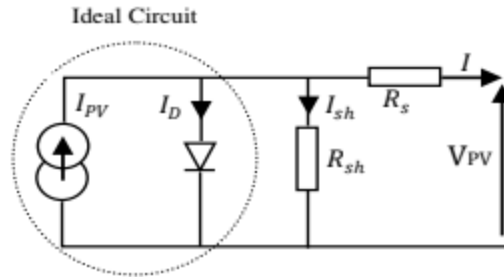


Fig II.7. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

Dans ce modèle, la cellule solaire est représentée comme une source de courant en parallèle avec une diode. La résistance en série correspond à la résistance de contact, tandis que celle en parallèle représente la résistance de dérivation pour les courants de fuite. L'équation caractéristique du courant de sortie de la cellule solaire I est donnée par : [12]

II.7. Influence des paramètres sur la caractéristique $I(V)$ & $P(V)$

II.7.1. Influence de l'éclairement

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ est clairement démontrée. À température constante, on remarque une variation significative du courant, tandis que la tension présente des variations minimales. Ceci s'explique par le fait que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement, tandis que la tension de circuit ouvert suit une fonction logarithmique en fonction de l'éclairement [1][13][12].

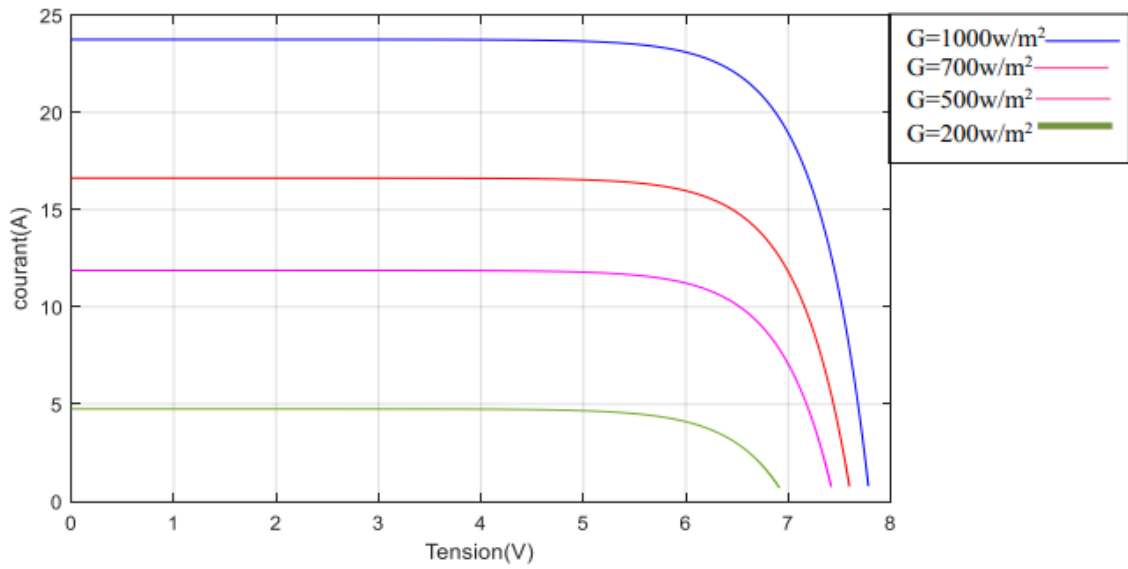


Fig II.8. Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

La figure II.9 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement. Cette représentation nous permet de discerner précisément l'impact de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

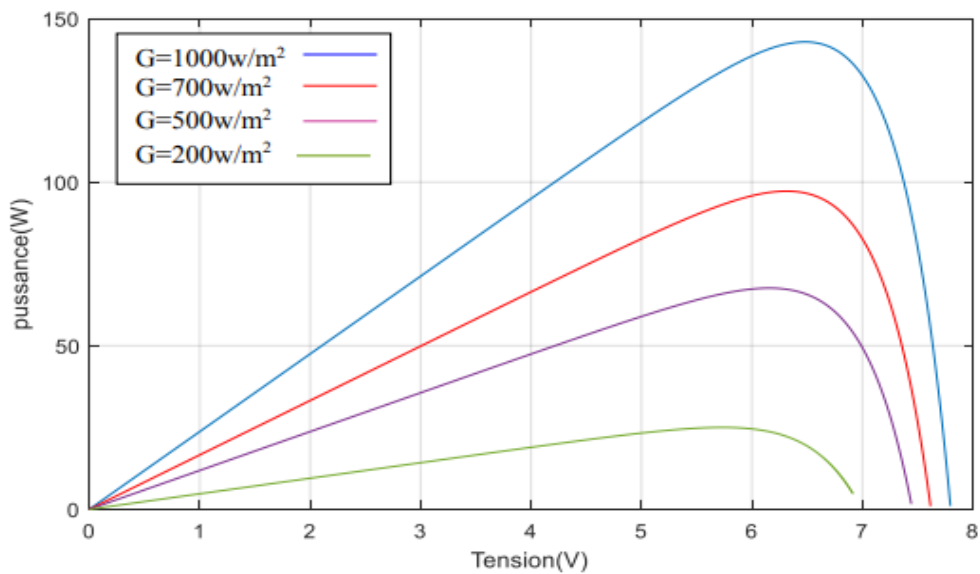


Fig II.9. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

II.7.2. Influence de la température

La figure II.10 expose l'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$. Comprendre l'effet du changement de température sur cette caractéristique d'une cellule solaire est essentiel. Le courant varie en fonction de la température, augmentant légèrement avec l'élévation de celle-ci, tandis que la tension de circuit ouvert diminue. Ainsi, une augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance maximale du générateur.

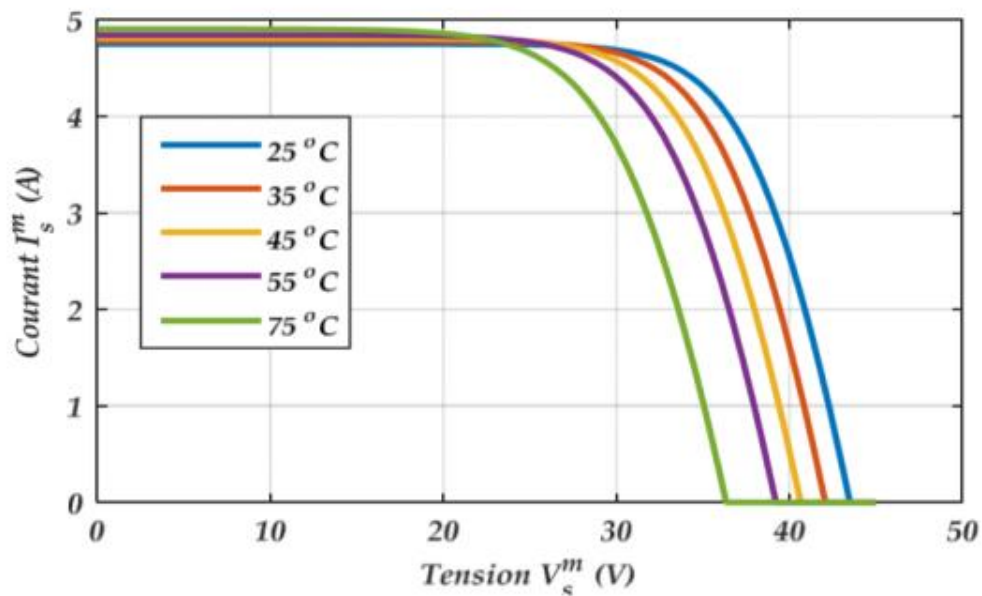


Fig II.10. L'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$

La figure II.11 met en évidence la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température. Cette analyse nous permet de préciser l'influence de la température sur la caractéristique $P(V)$.

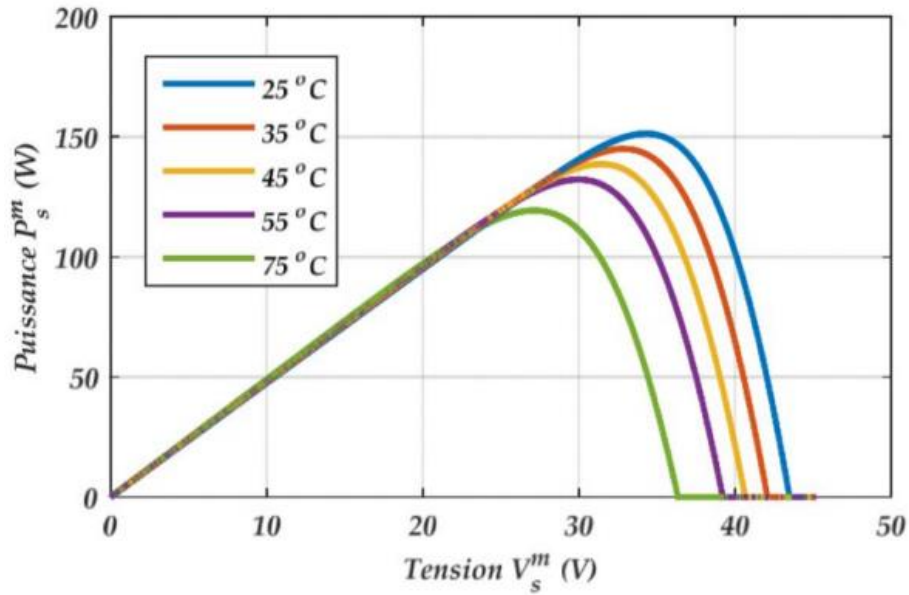


Fig II.11. L'influence de la température sur la caractéristique P(V)

II.8. Modélisation des convertisseurs statiques

II.8.1. Convertisseurs DC-DC

II.8.1.1. Convertisseur DC/DC : (Hacheurs)

Les convertisseurs DC-DC offrent une grande souplesse et un rendement élevé pour contrôler la puissance électrique dans les circuits en courant continu. Les convertisseurs DC-DC sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour maintenir le point de fonctionnement optimal[14]

Effectivement, il serait avisé de se positionner à ce point précis, mais il varie beaucoup en raison des variations de la température de l'éclairage. Afin de remédier à cette situation et accroître l'efficacité énergétique du système, un système électronique utilisant un convertisseur DC-DC est placé entre le générateur photovoltaïque et la masse.

Le maintien de ce point de fonctionnement au point de puissance est assurée par le contrôle continu du rapport cyclique de convertisseur de puissance[15]

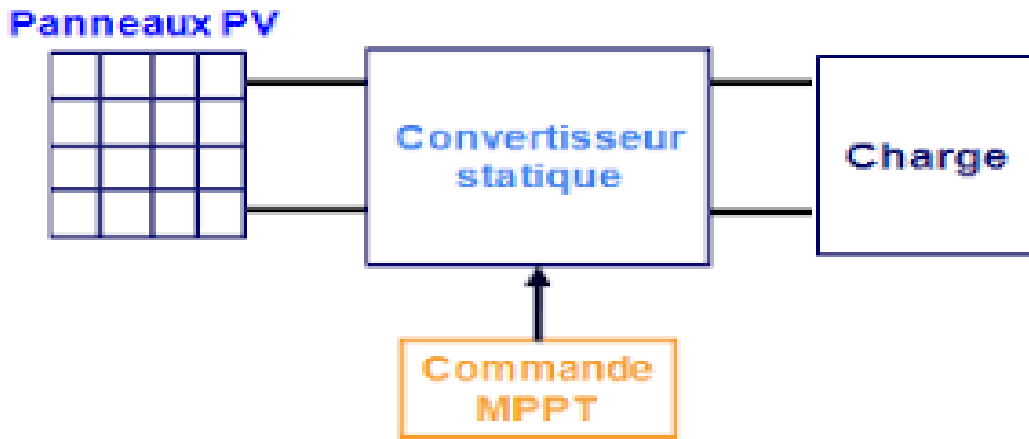


Fig II.12. Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur)

II.8.1.2. Types des convertisseurs DC-DC

Différentes configurations de convertisseurs DC-DC sont disponibles, classées en fonction de leur isolement ou non. Les alimentations à découpage utilisent fréquemment des topologies isolées qui utilisent un transformateur d'isolement à haute fréquence. Le Fly back, le demi-point et le pont complet sont parmi les topologies isolées les plus fréquentes. Dans les applications photovoltaïques (PV), ces structures sont couramment employées lorsque l'isolation électrique est requise pour des raisons de sécurité.

Par ailleurs, les structures non isolées ne font pas appel à des transformateurs d'isolement. En général, elles sont utilisées dans des domaines tels que l'entraînement des moteurs à courant continu.

Ces topologies peuvent être classées en trois catégories principales :

- Les abaisseurs (**Buck**)
- Les éleveurs (**Boost**)

- Les élévateurs-abaisseurs (**Buck-Boost**)

Le convertisseur Buck est employé afin de réduire la tension, fréquemment dans les domaines de la photovoltaïque tels que les chargeurs de batteries ou les systèmes de pompage d'eau.

De son côté, le convertisseur Boost est employé afin d'accroître la tension, en particulier dans les systèmes de production d'énergie afin d'augmenter la tension de sortie avant l'étage de l'onduleur.

Enfin, il y a des configurations telles que le Buck-Boost, qui peuvent ajouter ou réduire la tension en fonction des exigences.

En résumé, les convertisseurs DC-DC jouent un rôle crucial dans l'adaptation des tensions pour répondre aux besoins spécifiques des différentes applications, en transformant efficacement la tension continue d'une source à une autre.[15].

Tab II.2. Type des convertisseurs

Convertisseur	Rapporte de transformation en fonction de (α)	Isolement galvanique
Buck	α	Non
Boost	$\frac{1}{1 - \alpha}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Non

Dans le tableau II.2, la relation entre le taux de transformation (K) et le taux de cycle (α) pour différentes structures de transformateurs de puissance fixes avec et sans isolation électrique est expliquée. Lorsque nous parlons du taux de transformation (K), nous entendons le rapport entre la tension de sortie du transformateur et la tension d'entrée. Quant au taux de cycle (α), il représente la proportion du cycle du courant électrique à travers le transformateur.

Le convertisseur Boost parallèle régule le courant d'un générateur vers une charge à tension variable. Il est appelé "Boost" car la tension de sortie est supérieure à la valeur moyenne de la tension d'entrée. Il est connecté en série avec la source pour éviter les courts-circuits lorsque l'interrupteur k est fermé, tout en limitant les fluctuations du courant.

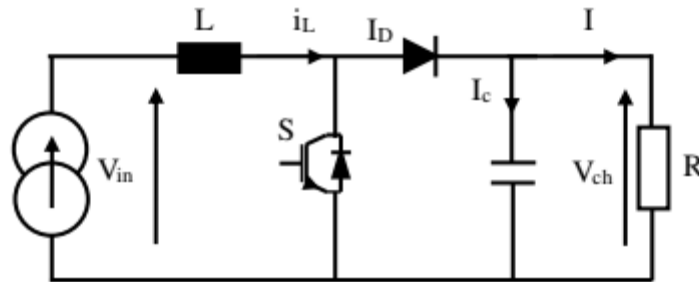


Fig II.13. Convertisseur boost

- Lorsque l'interrupteur k est fermé entre $[0, T\alpha]$, le courant traverse l'inductance L et la diode reste bloquée, ce qui signifie que le courant I est nul car la diode ne permet pas au courant de circuler dans cette direction.

Lorsque l'interrupteur K est fermé $0 < t < \alpha T_d$

$$L \frac{di}{dt} = V_e \tag{II-1}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \tag{II-2}$$

Avec la valeur minimale du courant dans l'inductance.

- A l'instant $t = \alpha T_d$ le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \tag{II-3}$$

- Lorsque l'interrupteur k est ouvert entre $[T\alpha, T]$, le courant continue de circuler à travers l'inductance L et la diode pour limiter la charge R. En d'autres termes, le courant continue

de circuler dans la boucle formée par l'inductance et la diode pour maintenir la charge R à un niveau contrôlé.[1]

- Lorsque l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$).

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II-4})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II-5})$$

- A l'instant $t = T_d$ le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha T_d) \quad (\text{II-6})$$

II.8.2. Onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

Généralement, l'onduleur NPC à trois niveaux est connecté entre la tension du lien DC et la charge du système. Il est utilisé pour réguler la tension et la fréquence de la charge. Notez ici que notre système est hors réseau, donc la tension de la charge doit être régulée en termes de fréquence et d'amplitude de la tension [8, 9]. La topologie d'un onduleur à trois niveaux est illustrée dans la FigII.14, où les interrupteurs supérieurs de l'onduleur à trois niveaux sont Sk1, Sk2 en état ON, ce qui correspond à l'état Vdc1. Si Sk3, Sk4 sont les interrupteurs inférieurs, cela correspond à l'état -Vdc2. Cela résulte en une condition 0 lorsque les interrupteurs auxiliaires sont en ON Sk3, Sk4 [24][25].

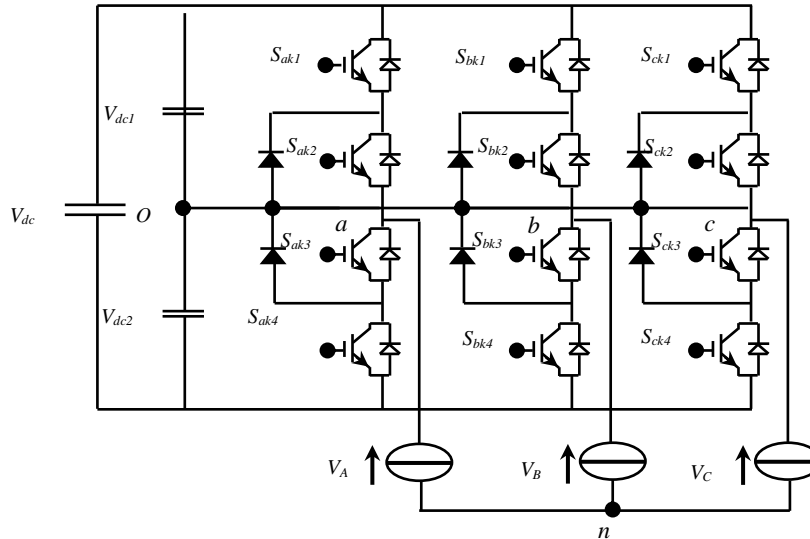


Fig II.14. Onduleur triphasé à trois niveaux NPC

II.8.2.1 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Il est nécessaire de déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple VAM entre la borne "A" de la charge et le point neutre M. Cette tension est définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs TDK1, TDK2, TDK3 et TDK4 du bras. Le sens positif ou négatif des courants i_{d1} , i_{d2} et i_{d3} fixe la direction du transfert d'énergie du convertisseur.

Lorsque la source réseau est génératrice et que la source de courant en sortie est réceptrice, la liaison des deux sources s'effectue à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la sortie vers l'entrée, ce sont les diodes qui assurent le passage du courant.

Pour décrire les différentes séquences de fonctionnement du convertisseur, examinons d'abord les valeurs que peut prendre la tension VAM. Cette tension est entièrement définie par l'état des quatre interrupteurs du bras.

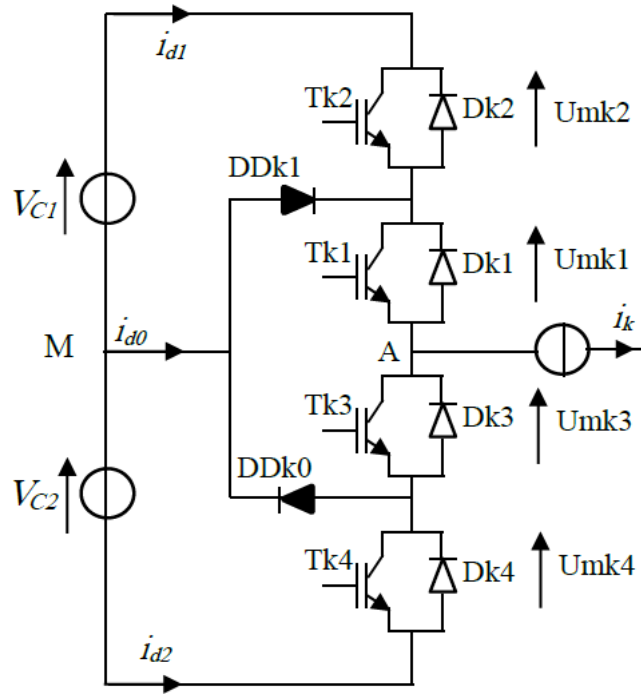


Fig II.15. Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

La fonction de connexion de l'interrupteur FKS indique l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur SKS, $F_{k1} = 1$ lorsque SKS est fermé et $F_{k1} = 0$ lorsque SKS est ouvert ($S = 1, 2, 3, 4$ et $k = 1, 2, 3$). La fonction de connexion F_{km}^b est donnée par :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

Alors que:

$m=1$: la partie supérieure de l'onduleur NPC fonctionne.

$m=0$: La partie inférieure de l'onduleur NPC fonctionne.

Les tensions de phase V_{A0} , V_{B0} et V_{C0} peuvent être écrites comme :

$$\begin{cases} V_{A0} = F_{11}^b \cdot V_{dc1} - F_{10}^b \cdot V_{dc2} \\ V_{B0} = F_{21}^b \cdot V_{dc1} - F_{20}^b \cdot V_{dc2} \\ V_{C0} = F_{31}^b \cdot V_{dc1} - F_{30}^b \cdot V_{dc2} \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

Les tensions de sortie simples sont écrites comme :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} V_{dc1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} V_{dc2} \right\} \quad (\text{II-9})$$

II.9. Commande MPPT

La technologie MPPT, également connue sous le nom de Maximum Power Point Tracking, est employée dans les systèmes d'énergie solaire afin d'améliorer la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ce processus consiste à adapter les conditions de fonctionnement du panneau solaire afin de s'assurer qu'il reste toujours en fonctionnement au point de puissance maximale (MPP), le point où le panneau solaire peut produire la quantité maximale d'énergie électrique pour des conditions réelles comme la température et l'intensité lumineuse.

Les systèmes de point de puissance maximale (MPPT) surveillent en permanence les performances du panneau solaire et régulent le courant et la tension d'entrée afin de le maintenir en fonctionnement autant que possible. Cela contribue à accroître l'efficacité de conversion d'énergie et à améliorer les performances des systèmes solaires, ce qui se traduit par une production d'électricité plus importante avec les mêmes panneaux solaires et à un coût réduit.[16]

II.9.1. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

Afin d'améliorer l'efficacité de la source photovoltaïque (PV), un convertisseur d'énergie DC-DC est intégré entre la source PV et la charge, jouant le rôle d'un quadripôle d'adaptation. Le contrôle précis de ce convertisseur repose sur une adaptation minutieuse de son rapport cyclique. On effectue cette adaptation en effectuant une recherche automatique du point de puissance maximale (PPM) du panneau photovoltaïque, ce qui permet de suivre en permanence la puissance maximale disponible.

Ce genre de convertisseur a été développé dans le but de modifier en temps réel l'impédance apparente de la charge pour correspondre à l'impédance du champ photovoltaïque au point de puissance maximum. On appelle généralement ce système d'adaptation le suivi du point de puissance maximale (MPPT - suivi du point de puissance maximale).

Le rendement de ce système se situe généralement entre 90 et 95%. [17]

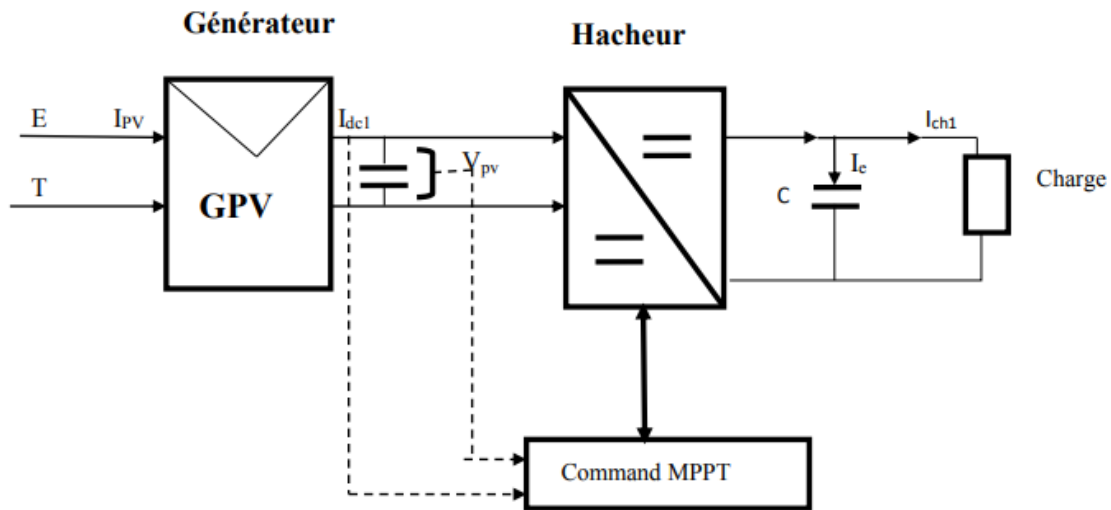


Fig II.16. Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT[3].

II.9.2. Principe de fonctionnement MPPT

Un "Maximum Power Point Tracking" (en anglais "Maximum Power Point Tracking") est un dispositif qui permet d'améliorer la production d'énergie d'un générateur électrique non linéaire, comme un panneau solaire. La tension de sortie du panneau solaire est constamment ajustée afin de maximiser la puissance fournie à la charge, à l'instar d'une batterie par exemple. Ceci favorise une utilisation optimale de l'énergie solaire disponible et assure des performances optimales du système photovoltaïque. [18][19]

Cette figure : représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

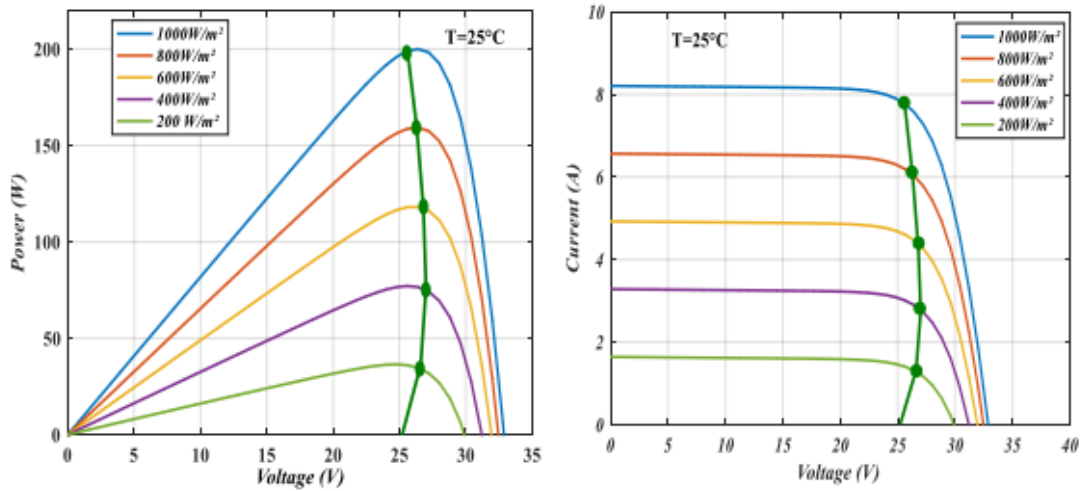


Fig II.17. Caractéristiques I(V), P(V) et trajectoire du point de puissance maximale[20]

Le schéma synoptique d'un module solaire avec un étage d'adaptation DC-DC entre le PVG et la charge de sortie est présenté dans la Figure (II.18).

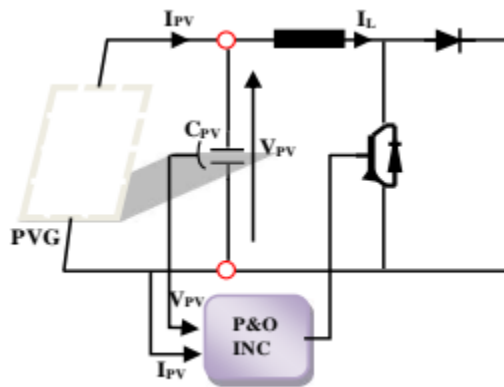


Fig II.18. Schéma synoptique de l'association photovoltaïque avec MPPT

II.9.3. Types d'algorithme de MPPT :

Les algorithmes les plus utilisés et très connus dans le monde sont :

- Algorithmes Perturber et Observer (P & O).

- Algorithmes de la conductance incrémentale (INC).
- Algorithmes Tension constante (CV : constant Voltage).
- Algorithmes courant constante (CC : Constant Curent).
- Algorithmes Capacité Parasite (PC : Parasite Capacitance).

Chaque technique a ses propres avantages et inconvénients en termes de simplicité, d'efficacité et de robustesse. Dans notre travail, nous appuyons principalement sur la méthode de perturbation et observation (P&O), qui est facile à mettre en œuvre et donne de bons résultats.[20]

II.9.3.1. La méthode Perturbation et Observation P&O

Étant donné que la procédure de recherche du point de puissance maximale (PPM) doit être répétée périodiquement, forçant le système à osciller en permanence autour du PPM une fois qu'il a été atteint, la méthode Perturbe et Observe (P&O) est largement utilisée en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cependant, elle présente des problèmes avec les oscillations autour du PPM qu'elle génère en régime permanent. La valeur de la variable de perturbation peut être réduite pour diminuer les oscillations. Cependant, un petit nombre d'incrémentes ralentit la recherche du PPM, donc un équilibre entre précision et vitesse doit être trouvé. Cela rend cette commande difficile à optimiser [20][11]

Dans la méthode P&O, la tension $V_{PV}(K)$ et le courant $I_{PV}(K)$ sont mesurés pour calculer la puissance de sortie $P_{PV}(K)$. Cette valeur $P_{PV}(K)$ est comparée à la valeur $P_{PV}(K - 1)$ selon l'équation suivante :

$$\Delta V_{PV} = V_{PV}(K) - V_{PV}(K - 1) \quad (\text{II-10})$$

$$\Delta I_{PV} = I_{PV}(K) - I_{PV}(K - 1) \quad (\text{II-11})$$

$$\Delta P_{PV} = P_{PV}(K) - P_{PV}(K - 1) \quad (\text{II-12})$$

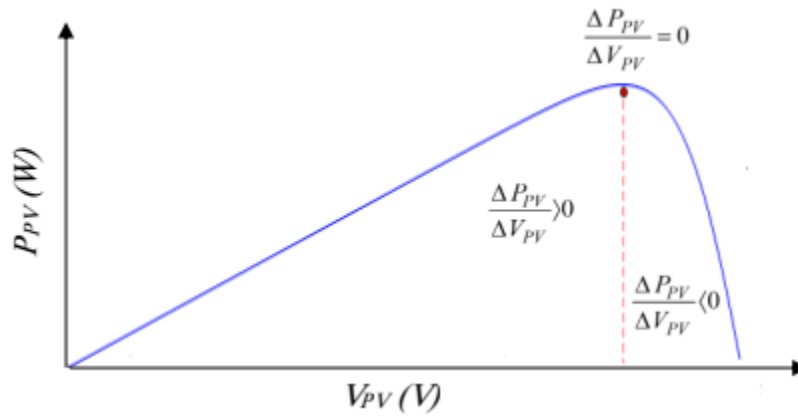


Fig II.19. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

La figure suivant montre l’organigramme de l’algorithme P&O [11]

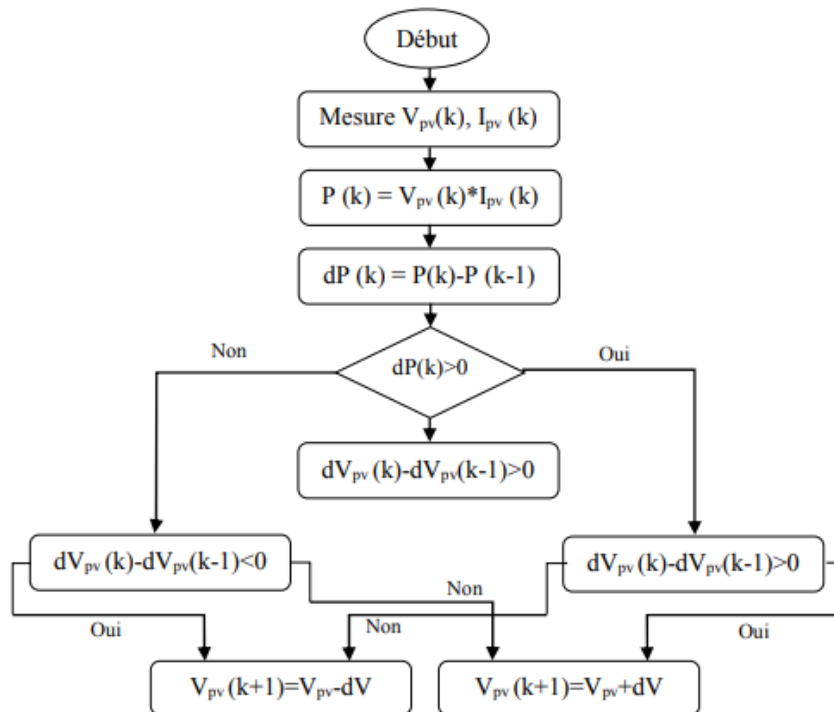


Fig II.20. Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P&O) [11]

L'algorithme "P&O" présente des limitations qui réduisent son efficacité. Lorsque l'intensité du soleil diminue, il est difficile pour le MPPT de discerner emplacement du PPM. Un autre

inconvenient de l'algorithme "P&O" est qu'il ne peut pas déterminer quand il a vraiment atteint le PPM. À ce moment-là, il oscille autour du PPM, changeant le signe de la perturbation (dV) après chaque mesure de (dP). De plus, il a été démontré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique en cas de changement rapide du niveau d'insolation (passage d'un nuage mobile). [11][12]

✓ **Avantages et inconvénients de P&O [21]**

• **Avantage**

- Topologie de régulation simplifiée
- Le nombre de paramètres mesurés est réduit.

• **Inconvénients :**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques

II.10. Description d'un système hybride PV/ Banc de Batteries.

Le système hybride se compose d'une source d'énergie renouvelable, qui est un dispositif convertissant l'énergie solaire en une énergie utilisable, et d'une batterie solaire. Ce système est utilisé pour alimenter une charge en courant alternatif variable. La figure(II.21) présente la structure complète du système hybride, incluant :

- Un convertisseur d'énergie solaire comme source principale d'énergie.
- Une batterie solaire comme source secondaire d'énergie.
- Une charge en courant alternatif variable.
- Un filtre LC pour réduire les interférences.
- Un onduleur triphasé à trois niveaux avec une structure NPC.
- Un hacheur élévateur fonctionnant en MPPT.
- Un hacheur élévateur abaisseur bidirectionnel reliant le banc de batteries au bus continu.

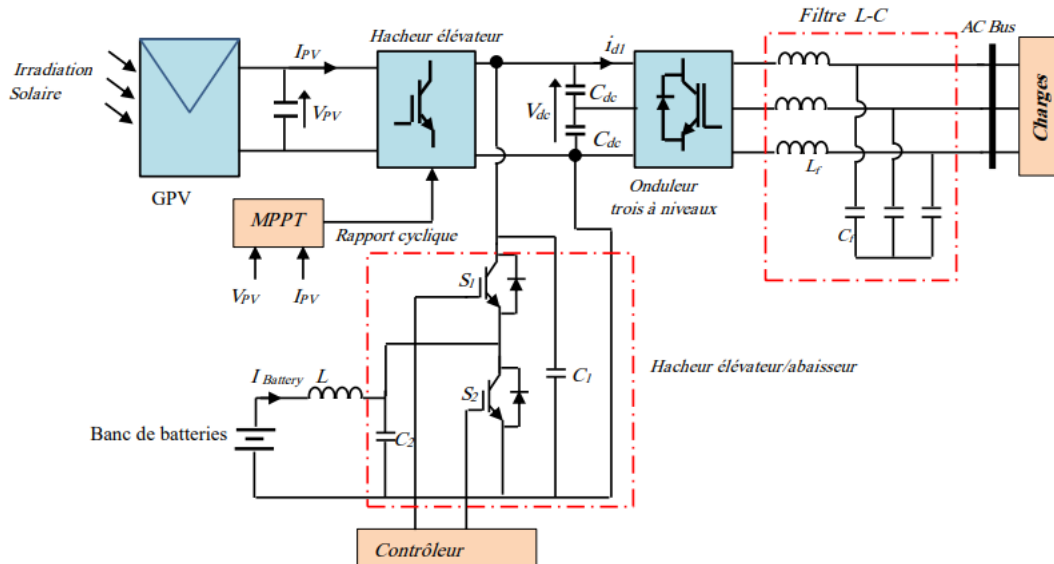


Fig II.21. Structure du système hybride PV/Banc de Batteries

II.11. Modélisation de la deuxième chaîne conversion

Dans notre système, la deuxième étape de conversion comprend un ensemble de batteries solaires associé à un convertisseur DC/DC élévateur-abaisseur, connecté au bus continu partagé du dispositif hybride. Les batteries doivent être capables de fonctionner dans des conditions variables telles que des niveaux de charge et de décharge changeants, des variations de température, etc.[1][2]

Ces fluctuations rendent difficile la prédiction précise des performances de la batterie dans un système à énergies renouvelables.

Les taux élevés de charge et de décharge, ainsi que la température, sont les principaux facteurs de défaillance des batteries. Par conséquent, un contrôleur de charge et de décharge efficace est essentiel pour garantir la fiabilité et la sécurité des batteries.

Il est donc crucial de modéliser la batterie pour améliorer ses performances en intégrant un système de contrôle adéquat. [4]

Il y a actuellement deux types d'accumulateurs couramment utilisés dans les systèmes d'énergies renouvelables : les accumulateurs au plomb-acide et les accumulateurs au nickel-cadmium.

Dans le cadre de ce projet, nous avons opté pour l'utilisation de batteries au plomb-acide en raison des avantages qu'elles offrent pour les systèmes isolés de production d'énergie.

II.12. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le Schéma électrique équivalent est illustré dans la figure(II.22). Afin de permettre la bidirectionnalité du flux de puissance, il est essentiel que les interrupteurs du convertisseur soient capables de commuter le courant dans les deux sens. Dans un sens, le convertisseur fonctionne en mode décharge, transférant l'énergie de la batterie vers le bus DC lorsque la production d'énergie renouvelable est insuffisante. Dans l'autre sens, il opère en mode charge.

Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur élévateur (Boost) lors de la décharge de la batterie, transférant l'énergie de la batterie vers le bus DC lorsque la production d'énergie renouvelable est insuffisante. En revanche, il agit comme un convertisseur abaisseur (Buck) pendant la charge de la batterie. [1][12]

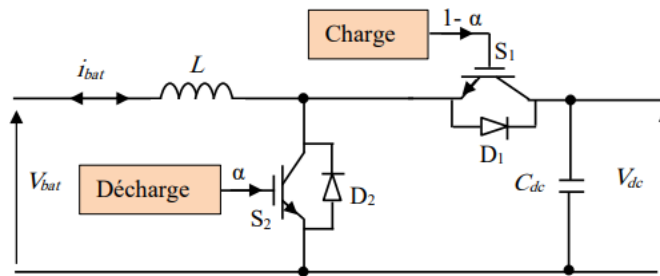


Fig II.22. Schéma électrique du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équation suivante [13] [14].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_l = \frac{1}{L} [V_{batt} - (1 - \alpha)V_{dc}] \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} [(1 - \alpha)i_l - i_0] \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

Ou : $i_L = i_{batt}$

II.13. Commande de la deuxième chaine conversion

La stratégie de contrôle du convertisseur bidirectionnel vise principalement à gérer le flux de puissance dans les deux sens. Cela implique de déterminer quand la batterie doit fournir de l'énergie ou être en mode charge, en fonction de l'état du système hybride.

Un algorithme de gestion est utilisé pour prendre ces décisions et définir la configuration de fonctionnement de la batterie. En parallèle, la régulation de la tension V_{dc} du bus DC est également un objectif essentiel du contrôle du convertisseur bidirectionnel. Cette stratégie de commande est essentielle pour assurer un fonctionnement efficace et stable du système hybride. [1]

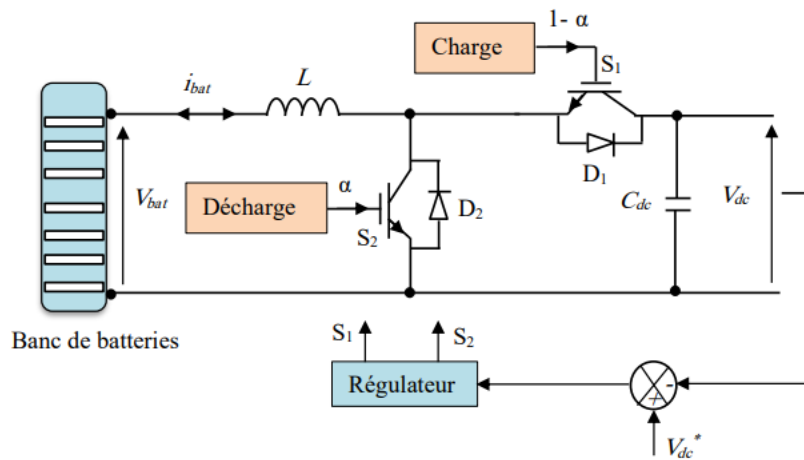


Fig II.23. Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le tableau II.3 résume le fonctionnement du convertisseur bidirectionnel.

Tab II.3. Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes

Mode décharge ($i_{bat} > 0$)	Commande	S_2	D_2
	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$	ON	OFF
	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$	OFF	ON
Mode charge ($i_{bat} < 0$)	Commande	S_1	D_1
	$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$	ON	OFF
	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$	OFF	ON

II.14. Contrôle de la tension du Bus continu V_{dc}

La régulation de la tension du bus continu consiste à maintenir la tension à un niveau constant en contrôlant le processus de charge et de décharge de la batterie. Pour ce faire, on utilise le courant injecté dans le condensateur V_{dc} pour commander le bus continu, ce qui permet de déterminer les paramètres du correcteur nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système. [4]

Dans cette partie, nous utilisons une type de régulateur, à savoir le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé).

II.14.1. Contrôleur PID.

Le contrôle par PID est souvent utilisé pour les asservissements en raison de sa simplicité de programmation sur un processeur. Cette méthode repose sur une structure qui génère un signal de commande en fonction de l'erreur entre la référence et la mesure, comme illustré dans la figure (II.24).

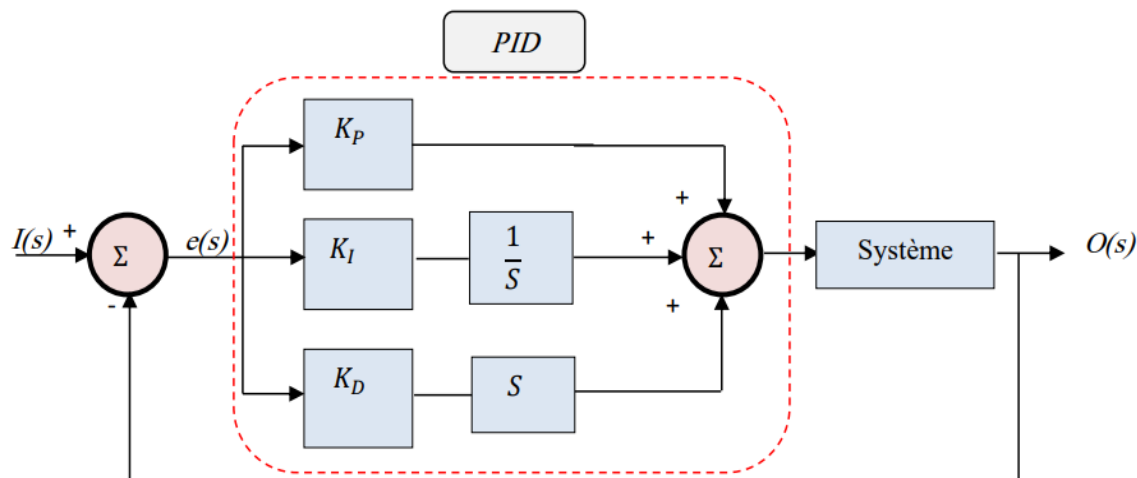


Fig II.24. Schéma bloc d'un régulateur PID.

Sur la base d'une fonction de transfert du bus continu $\frac{1}{c.s}$ Le contrôleur PID est utilisé pour maintenir la tension à une valeur de référence spécifique dans notre mémoire .

Le contrôle PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) est une méthode de régulation utilisée dans divers systèmes industriels et de contrôle automatique pour maintenir une variable de processus à

une valeur souhaitée. Voici une brève description des composantes et du fonctionnement du contrôleur PID :

- **Proportionnel (P) :** Cette composante réagit proportionnellement à l'erreur actuelle, c'est-à-dire la différence entre la valeur mesurée et la valeur de consigne. La formule est : $P = K_p \cdot e(t)$, où K_p est le gain proportionnel et $e(t)$ est l'erreur à l'instant t .
- **Intégral (I) :** Cette composante tient compte de l'accumulation des erreurs passées. Elle est utilisée pour éliminer l'erreur résiduelle qui peut persister avec le seul contrôle proportionnel. La formule est $I = K_i \times \int e(t) dt$ où K_i est le gain intégral.
- **Dérivé (D) :** Cette composante prédit les tendances futures de l'erreur en réagissant à la vitesse de variation de l'erreur. Cela aide à réduire l'overshoot et à améliorer la stabilité. La formule est $D = K_d \frac{de(t)}{dt}$ où K_d est le gain dérivé.

III.14.1.1.Fonctionnement du contrôleur PID

Le signal de sortie du contrôleur PID est la somme des contributions proportionnelle, intégrale et dérivée :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

- Proportionnel (P) : Répond rapidement à l'erreur actuelle mais peut conduire à une erreur stable.
- Intégral (I) : Corrige l'erreur cumulée au fil du temps, éliminant ainsi l'erreur stable.
- Dérivé (D) : Anticipe les tendances futures de l'erreur, améliorant la stabilité du système et réduisant dépassement.

III.14.1.2.Avantages du contrôle PID

- Simplicité : Facile à comprendre et à implémenter.

- Flexibilité : Peut être ajusté pour répondre à diverses exigences de performance en modifiant les gains K_p , K_i et K_d .
- Stabilité : Améliore la stabilité du système et réduit dépassement.

III.14.1.3.Applications du contrôle PID

- Automatisation industrielle : Régulation de température, pression, niveau de liquide, etc.
- Systèmes mécaniques : Contrôle de position et de vitesse des moteurs.
- Robotique : Contrôle de mouvement précis.
- Aéronautique : Stabilisation des avions et des drones.

En résumé, le contrôleur PID est un outil polyvalent et efficace pour la régulation automatique dans de nombreux domaines, offrant un équilibre entre réactivité, précision et stabilité.

II.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système d'énergie renouvelable (PV + hacheur) qui forme une chaîne de conversion à deux étages. Nous avons d'abord présenté le modèle de source photovoltaïque, puis nous l'avons exposé à différentes radiations et températures pour étudier l'impact de ses paramètres météorologiques sur l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque de notre chaîne de conversion. Ensuite, le convertisseur élévateur (Boost) qui forme la première étape, la dernière étape a été appliqué avec l'algorithme classique de maximisation de la puissance de point de puissance maximale (MPPT) P&O (Perturbation and Observe).

Également dans ce chapitre, nous avons présenté une description de notre système GPV / Battery Bank à sources multiples, en détaillant la modélisation de la deuxième chaîne de conversion composée du banc de batteries solaires et du convertisseur DC/DC bidirectionnel. Pour stabiliser la tension du courant continu, nous avons présenté la structure du régulateur PID utilisé pour contrôler notre booster de tension. Ce contrôle du convertisseur aide également à protéger le BB contre les surcharges et les décharges excessives.

Enfin, les deux chaînes GPV / Battery Bank seront connectées à une autre source d'énergie renouvelable, une éolienne, qui sera abordée dans le prochain chapitre avec la présentation de modèles et de simulations de cette source. Ce système constitue le premier système à sources multiples étudié dans cet article et est le sujet du dernier chapitre.

Références

- [1] BAHRI Ahmed, “Optimisation d’un système de production d’énergie multi-sources,” p. 149 page.these de Doctorat,université de 20 Août 1955- Sekika,2022.
- [2] H. C. E. Auguste, “CONCEPTION ET REALISATION D’UNE APPLICATION MOBILE DE DIMENSIONNEMENT DE SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE POUR LE BENIN”Institut National Supérieur de Technologie de LOKOSSA.
- [3] B. GHARBI, “Elaboration et caractérisation de films minces d’oxydes transparents conducteurs (TCO).” Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [4] R. Jimmy, D. Thomas, S. Eric, and S. S. Bocar, “Le pompage photovoltaïque,” Édition Multi mondes,université de Mohamed Boudiafe-M’sila 1999.
- [5] F. Sofiane and M. Siham, “Etude d’un système photovoltaïque connecte au réseau.” Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [6] A. Borni and R. Chenni, “Etude et optimisation d’un multi système hybride de conversion d’énergie électrique,” université de frère Mentouri Constantine,2015.
- [7] B. Benlahbib, “Supervision d’un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique.”Université de Alger, 2019.
- [8] A. GOURBI, “Contribution à l’étude d’un système photovoltaïque hybride de production d’énergie électrique.” Université de Djillali liabès de Sidi Bel Abbès 2017.
- [9] A. Ricaud, “Solar cells. From physics of photovoltaic conversion to chains of development, materials and processes; Photopiles solaires. De la physique de la conversion photovoltaïque aux filieres, materiaux et procedes,” 1997.
- [10] S. M. Kara, “Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS,” Mémoire de Magister, Tlemcen, 2012.
- [11] A. Bouchakour, A. Borni, and M. Brahami, “Comparative study of P&O-PI and fuzzy-PI

MPPT controllers and their optimisation using GA and PSO for photovoltaic water pumping systems,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 42, no. 15, pp. 1746–1757, 2021.

[12] “OPTIMIZATION OF A PHOTOVOLTAIC GENERATOR PERFORMANCE’S USING CONVENTIONAL MPPT ALGORITHMS,” HEMAMDIA NOURHENE, vol. 5.87MB, p. 120 page, université de ghardaia 2022.

[13] A. TOUAHRI and M. Y. Kadai, “Estimation des de la production d’électricité des centrales photovoltaïques. Cas d’étude centrale PV Oued N’échoue Ghardaïa.” UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.

[14] D. AOUN, “MARTICE DE MIROPHONE.” 2021.

[15] A. Belkaid, “onception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome.” Université de FERHAT Abbas-Setif 2018.

[16] W. Boucheritte, “Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau,” Mémoire Magister en Electrotech. Univ. Mohamed Khider, Biskra, 2013.

[17] S. BEDDIAR, “Modélisation et simulation d’un système hybride photovoltaïque/thermique.” Université de Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tebessa 2021.

[18] D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms,” *Prog. photovoltaics Res. Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–62, 2003.

[19] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” *IEE Proceedings-Generation, Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 1, pp. 59–64, 1995.

[20] A. Borni, N. Bouarroudj, A. Bouchakour, and L. Zaghba, “P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study,” *Int. J. Power Electron.*, vol. 8, no. 4, pp. 300–322, 2017.

[21] H. BOUZERIA, “Modélisation et commande d’une chaine de conversion photovoltaïque.” Université de Batna 2, 2016.

- [22] Y. C. Qin, N. Mohan, R. West, and R. H. BONN, “Status and needs of power electronics for photovoltaic inverters,” Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia ..., 2002.
- [23] CHEKIRED Fathya, “ETUDE ET IMPLEMENTATION D’UNE COMMENDE MPPT NEURO-FLONE SUR FPGA CHEKIRED Fathya Ingénieur d’Etat en Electronique, Université de Jijel,” CHEKIRED Fathya, 2008.
- [24] A. Bahri, A. Thameur, M. Mordjaoui, M. Bechouat, and M. Sedraoui, “An optimal tilt integral derivative applied to the regulation of DC link voltage in a stand-alone hybrid energy system,” *J. Eur. des Systèmes Autom.*, vol. 54, no. 4, pp. 607–616, 2021.
- [25] M. Koulali, A. Berkani, K. Negadi, M. Mankour, and A. Mezouar, “Sliding fuzzy controller for energy management of residential load by multi-sources power system using wind PV and battery,” *J. Eur. des Systèmes Autom.*, vol. 53, no. 3, pp. 305–315, 2020.

CHAPITRE III :

Modélisation du système éolien

III.1. Introduction

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelable, l'énergie éolienne est actuellement la plus compétitive et affiche le taux de croissance le plus élevé. Elle est devenue une réalité incontestable aujourd'hui.[1]

L'objectif d'une éolienne est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Tous ses éléments sont élaborés dans le but d'optimiser cette transformation énergétique. En général, une bonne correspondance entre les caractéristiques de couple et de l'efficacité de la turbine et de la génératrice électrique est essentielle pour optimiser cette conversion.

Il existe Plusieurs techniques sont employées pour capter l'énergie du vent, telles que les éoliennes à axe vertical ou horizontal. Les capteurs sont de plus en plus performants en termes de structures, permettant une meilleure capture de l'énergie éolienne.

Nous abordons également deux systèmes de contrôle :

- Un système de contrôle électrique qui permet de contrôler l'éolienne électriquement, utilisant une machine électrique associée à une commande.
- Un système de contrôle mécanique qui permet de contrôler l'éolienne mécaniquement, notamment en ajustant l'orientation des paliers de l'éolienne et la direction de la nacelle.[2]

Nous commencerons d'abord par présenter une description complète du nouveau système dans ce chapitre. Ensuite, nous détaillerons la modélisation des éoliennes ainsi que du générateur synchrone à aimants permanents. En troisième lieu, dans le but d'extraire le maximum d'énergie du vent à tout moment, le contrôle MPPT sera introduit dans le système de conversion éolienne.

III.2. Historique

L'idée d'exploiter l'énergie éolienne remonte à l'Antiquité, avec des civilisations anciennes telles que les Perses, les Égyptiens et les Chinois qui ont exploité le vent. Les premiers moulins à vent apparaissent à partir du 12ème siècle ont fait leur apparition en Europe, et au fil des siècles, cette technologie s'est répandue dans le monde entier. Ces moulins à vent, également appelés aéromoteurs, se sont avérés économiquement rentables et ont contribué au développement

économique de l'Europe en fournissant de l'énergie mécanique pour le pompage de l'eau, le broyage des grains et le sciage du bois, entre autres.



Fig III.1. Photographie de deux moulins à vent

Cependant, au 19^{ème} siècle, l'intérêt pour ces applications a commencé à diminuer en raison de l'évolution technologique pendant la révolution industrielle européenne. Avec l'avènement de l'utilisation massive du charbon, l'énergie éolienne a progressivement disparu de la scène. Cependant, après le choc pétrolier initial, des efforts ont été déployés pour relancer le développement de l'énergie éolienne, et les pays occidentaux ont réinvesti dans cette ressource, cette fois dans le but de produire de l'électricité.

Vers le début des années 1980, les investissements dans la recherche et la croissance de cette "redécouverte" énergétique ont connu une croissance fulgurante dans des pays tels que l'Allemagne, les États-Unis, le Danemark et l'Espagne. Après une période de tâtonnement, il est apparu que la stratégie la plus efficace consistait à accroître progressivement la puissance des éoliennes, en créant des marchés subventionnés qui offraient une base industrielle suffisante pour le développement de ce secteur.

En parallèle aux investissements dans le secteur éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir cette industrie. Dans certains cas, ces mesures incitatives se sont avérées efficaces pour créer une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques permettant des réductions de coûts, l'énergie éolienne est désormais compétitive par rapport à d'autres sources d'énergie traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays.[3]

III.3. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne, une forme d'énergie renouvelable, est captée par des éoliennes. Ces éoliennes utilisent l'énergie cinétique du vent pour faire tourner leur rotor, convertissant ainsi cette énergie en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en électricité grâce à une génératrice électromagnétique couplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être direct si la turbine et la génératrice fonctionnent à des vitesses similaires, sinon il nécessite l'utilisation d'un multiplicateur.

Une fois l'électricité produite, elle peut être utilisée de différentes manières : elle peut être stockée dans des accumulateurs, distribuée via un réseau électrique ou utilisée pour alimenter des charges isolées. Cependant, il convient de noter que le processus de conversion de l'énergie éolienne entraîne des pertes. Par exemple, le rendement peut être d'environ 59 % au niveau du rotor de l'éolienne et de 96 % au niveau du multiplicateur. De plus, il faut tenir compte des pertes au niveau de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.[4]

III.4. Principaux composants d'une éolienne

- Le mât, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine, est crucial car la vitesse du vent augmente en fonction de l'altitude. Par exemple, pour une éolienne de 500 kW, le mât peut avoir une hauteur comprise entre 40 et 60 mètres. Il peut être plein ou tubulaire, ce dernier étant plus coûteux mais offrant l'avantage d'un accès facile à la nacelle pour la maintenance.

- Les pales, qui captent la puissance du vent et la transmettent au rotor. Les premières éoliennes étaient équipées de deux pales, mais cette configuration présentait des inconvénients tels que des vibrations, des bruits et une fatigue accrue du rotor. Aujourd'hui, la plupart des installations sont équipées de systèmes à trois pales.

- La fondation, qui assure la stabilité de l'ensemble face aux vents forts et/ou aux conditions de givrage. Elle doit être solide pour garantir la résistance de l'éolienne dans ces conditions.

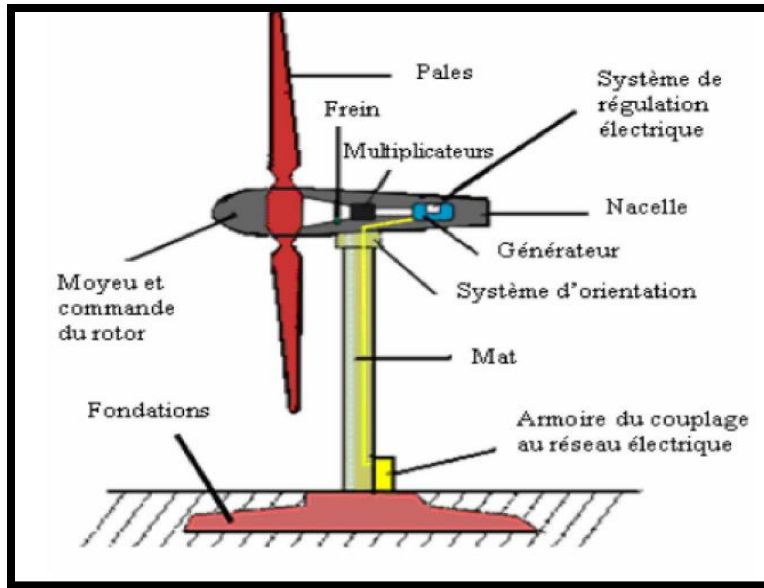


Fig III.2. Constitution d'une éolienne

- La nacelle, qui abrite tous les composants mécaniques nécessaires pour relier le rotor de l'éolienne au générateur électrique. Elle comprend des éléments tels que les arbres, le multiplicateur, les roulements, le frein à disque pour arrêter le système en cas de surcharge, ainsi que le générateur électrique, qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone. De plus, des systèmes hydrauliques ou électriques sont présents pour orienter les pales (frein aérodynamique) et la nacelle (pour maintenir la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). Enfin, un système électronique de gestion de l'éolienne est également intégré à la nacelle, comme illustré dans la figure (III.3).[5]

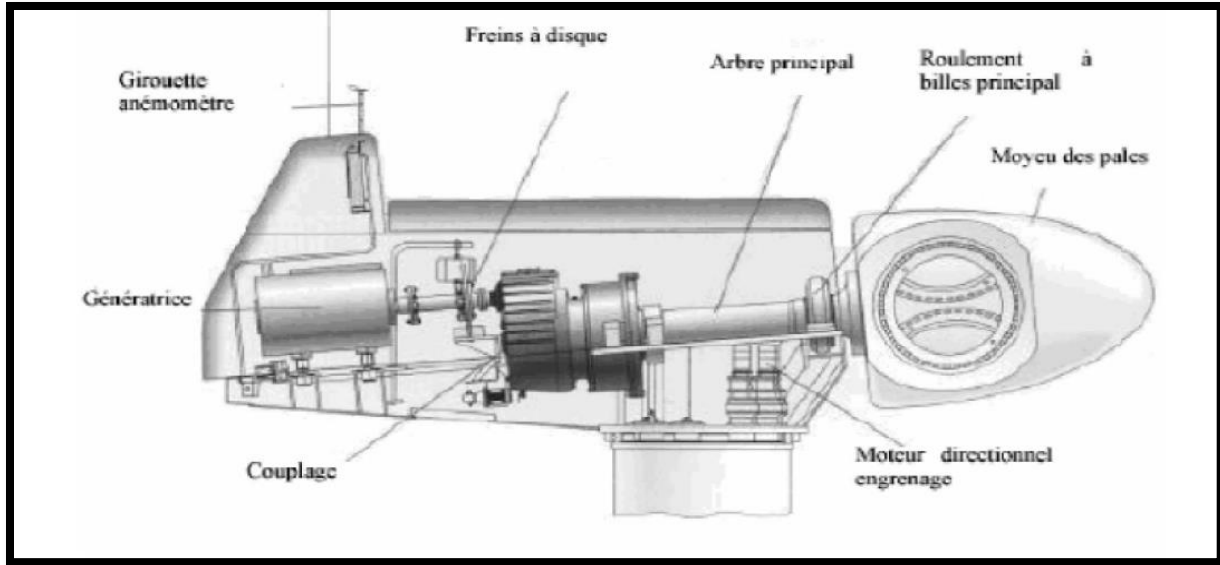


Fig III.3. Constitution de la nacelle

III.5. Différent type du l'éolien

Les éoliennes se classent généralement en deux grandes catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

- **Eoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures développées pour produire de l'électricité, bien que cela soit en contradiction avec le design traditionnel des moulins à vent à axe horizontal. Elles présentent l'avantage d'avoir les composants de commande et le générateur situés au niveau du sol, ce qui les rend facilement accessibles. Depuis les années vingt, de nombreuses variantes ont été testées, dont beaucoup sans succès, mais deux structures ont réussi à être industrialisées.

Le rotor de Savonius, nommé d'après son inventeur et breveté en 1925, fonctionne selon le principe de la "traînée différentielle", similaire à celui utilisé dans les anémomètres. Ce principe repose sur les différences d'efforts exercés par le vent sur les différentes faces d'un corps creux. Cela génère un couple moteur qui entraîne la rotation de l'ensemble. Dans le cas du rotor de Savonius, cet effet est renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur (voir Fig III.4).

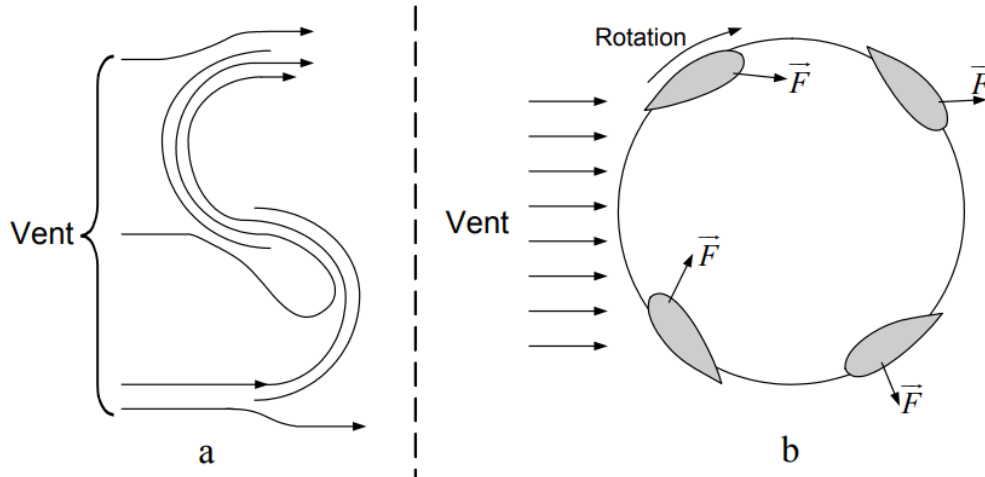


Fig III.4. Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence, dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (du nom de l'ingénieur français qui a déposé le brevet au début des années 30), fonctionnent sur le principe d'un profil placé dans un flux d'air à différents angles (voir *FigIII.4*). Ce profil est soumis à des forces de direction et d'intensité variables, ce qui génère un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces résultent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas démarrer spontanément ; lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit être lancée par un dispositif auxiliaire, tel que le montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou l'utilisation de la génératrice en tant que moteur.

Bien que quelques grands projets industriels aient été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent marginales, peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet, leur capteur d'énergie situé près du sol est exposé aux turbulences et au gradient de vent, ce qui réduit leur efficacité. De plus, elles sont sujettes à des problèmes d'aéroélasticité en raison des fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin, pour des puissances élevées, elles nécessitent une surface au sol considérable.

• Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal reposent sur la technologie ancienne des moulins à vent. Elles sont composées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement, similaires aux ailes d'un avion. Dans ce cas, la portance n'est pas exploitée pour maintenir un avion en vol, mais plutôt pour générer un

couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie généralement entre 1 et 3, avec le rotor à trois pales étant le plus courant en raison de son compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Les éoliennes à axe horizontal ont pris l'ascendant sur les éoliennes à axe vertical principalement en raison de leur coût moindre, de leur résistance accrue aux contraintes mécaniques et de la position du rotor, situé à plusieurs dizaines de mètres du sol, qui favorise leur efficacité. Cependant, il convient de noter que certains travaux défendent la viabilité des éoliennes à axe vertical en réalisant des études multicritères. Pour les besoins de cette étude, seules les éoliennes à axe horizontal seront abordées.[6]

III.6. Le principe de fonctionnement d'une éolienne

La fabrication d'électricité par une éolienne implique la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, suivant plusieurs étapes :

- Transformation de l'énergie par les pales : Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion. La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor en transformant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

- Accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur : Les pales tournent à une vitesse relativement lente, généralement entre 5 et 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à une très grande vitesse, souvent entre 1 000 et 2 000 tours par minute, pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.

- Production d'électricité par le générateur : L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est convertie en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

- Traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur : L'électricité produite ne peut pas être utilisée directement. Elle passe par un convertisseur pour être traitée, puis sa tension est élevée à environ 20 000 volts par un transformateur. Ensuite, l'électricité est acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, où elle est injectée dans le réseau électrique.[7]

III.7. Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé dans trois applications distinctes :

- ❖ Systèmes isolés ;
- ❖ Systèmes hybrides ;
- ❖ Systèmes reliés au réseau.

III.7.1. Les systèmes isolés

Dans les systèmes isolés, l'énergie éolienne est également utilisée pour fournir de l'énergie à des sites éloignés. Par exemple, elle est utilisée pour produire de l'électricité sur des îles, pour le pompage de l'eau dans des champs agricoles, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces systèmes isolés utilisent généralement des formes de stockage d'énergie. Le stockage peut être réalisé via des batteries, nécessitant ainsi un dispositif de contrôle de la charge et de la décharge de la batterie.

III.7.2. Systèmes hybrides

Dans les systèmes hybrides, plusieurs sources d'énergie sont utilisées, telles que les turbines éoliennes, les générateurs diesel et les modules photovoltaïques. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'électricité accroît la complexité du système et nécessite une optimisation de l'utilisation de chaque source. Dans ces systèmes, un contrôle de toutes les sources est nécessaire pour maximiser la fourniture d'énergie à l'utilisateur.

III.7.3. Systèmes reliés au réseau

Dans les systèmes liés au réseau, aucun système de stockage d'énergie n'est nécessaire. Par conséquent, toute l'électricité générée est directement injectée dans le réseau électrique. Cependant, ces systèmes nécessitent un convertisseur statique pour adapter les caractéristiques de l'énergie générée par les éoliennes aux exigences du réseau électrique.[8]

III.8. Les avantages et les inconvénients d'éolienne

III.8.1 Les avantages :

✓ L'énergie éolienne est une source d'énergie propre et renouvelable qui ne génère ni pollution ni déchets. De plus, elle rembourse rapidement son empreinte énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en seulement quelques mois ;

✓ L'énergie éolienne est abondante : le vent est une ressource inépuisable, ce qui en fait une véritable source d'énergie renouvelable ;

✓ L'industrie éolienne offre un potentiel significatif en termes d'emplois dans la fabrication et l'installation des éoliennes

Au-delà des aspects économiques et environnementaux, l'énergie éolienne revêt un intérêt particulier car elle peut contribuer à la diversification et à l'indépendance énergétique d'un pays.

III.8.2 Les inconvénients :

✓ La pollution visuelle et sonore ainsi que la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation des éoliennes près des habitations, ce qui contraint souvent leur installation à des endroits éloignés des zones résidentielles.

Sur le plan technique, l'énergie éolienne présente quelques inconvénients par rapport à d'autres types de production d'électricité :

✓ L'énergie éolienne est intermittente et difficilement prévisible.

✓ Son intégration dans les réseaux électriques pose des problèmes et des contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux. Tant que ce type de production reste marginal, les contraintes sont limitées. Cependant, avec le développement important et continu des parcs éoliens en termes de puissance installée, ceux-ci sont de plus en plus soumis à des exigences techniques strictes en matière de raccordement aux réseaux, définies par les gestionnaires de réseaux.

Aujourd'hui, en raison du développement important et continuellement croissant en termes de puissance installée des parcs éoliens, ces installations sont soumises à des exigences techniques de

plus en plus strictes imposées par les règles de raccordement aux réseaux. Ces règles sont définies à l'initiative des gestionnaires de réseaux.[9]

III.9. Protection contre la corrosion

Différents composants de l'éolienne sont protégés contre la corrosion par des revêtements multicouches spéciaux. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme le moyeu du rotor, sont galvanisés pour offrir une protection supplémentaire contre la corrosion.[10]

III.10. Modélisation du système éolienne

L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'énergie les plus respectueuses de l'environnement. L'énergie cinétique du vent est transformée par les éoliennes en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Une partie de l'énergie du vent est captée par les pales du rotor de l'éolienne qui la transmettent au moyeu, qui est attaché à l'arbre de l'éolienne. L'énergie mécanique est ensuite transférée au générateur. [12]

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne considérée dans cette étude est présentée à la figure (III.5). Il s'agit d'une éolienne, d'un générateur synchrone à aimant permanent, d'un redresseur à diode triphasé, d'un convertisseur DC/DC (hacheur) connecté au bus DC.[13][14]

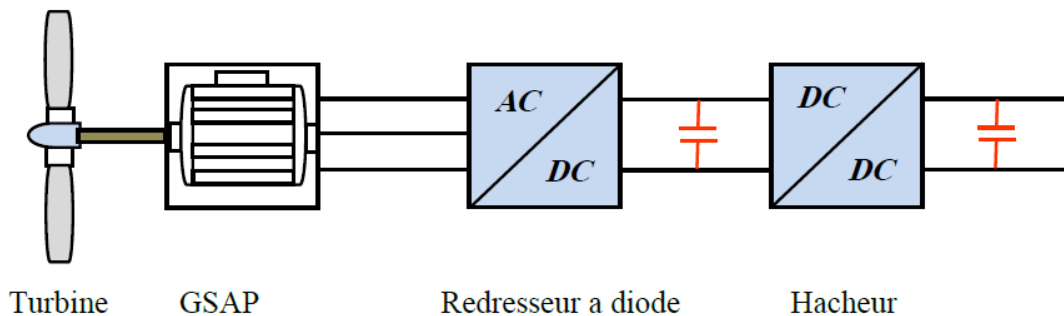


Fig III.5. Structure d'un système éolien à vitesse variable à base d'une machine GSAP.

III.10.1 Modèle de la turbine éolienne.

Dans cette étude, nous supposons que l'éolienne étudiée est constituée de trois pales de longueur R , attachées à un arbre d'entraînement qui tourne à une vitesse Ω_t , entraînant un générateur, comme le montre la Figure (III.6). [14][15][16]

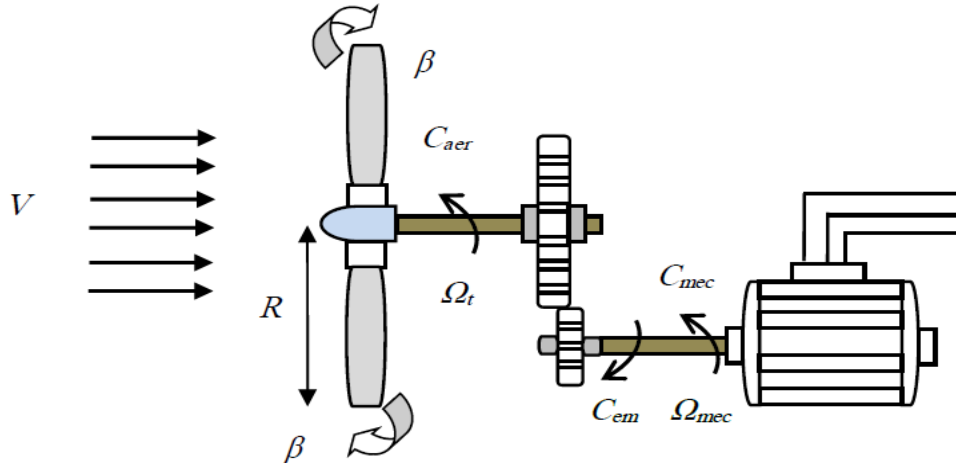


Fig III.6. Schéma de la turbine éolienne

Selon la vitesse du vent, de la densité surfacique et de la section transversale de la surface active S de la voile, la puissance de la masse d'air est représentée par: [14][15][17][18] [19]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{III- 1})$$

Où

$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$ Avec V_1 et V_2 sont respectivement les vitesses du vent en amont et en aval de l'éolienne.

ρ : Densité d'air

La force du vent n'est pas entièrement captée par les pales, la force aérodynamique est donc inférieure à la force du vent. Les deux forces sont liées par l'expression suivante :

$$P_{aer} = P_v \cdot C_p = \frac{1}{2} (\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3) \cdot C_p \quad (\text{III- 2})$$

Avec C_p est le coefficient de puissance. Cela dépend de l'angle d'inclinaison d'une pale β et du rapport de vitesse spécifique λ . La valeur maximale de ce coefficient est de 0,59 (16/27), appelée limite de Betz et donnée par la relation (III.15) : [20][12]

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left[\left(C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + \lambda C_6 \right] \quad (\text{III- 3})$$

Avec :

$$C_1 = 0.5176, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = -21, C_6 = 0.0068$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{III- 4})$$

$$\lambda = \frac{\Omega_i \cdot R}{V} \quad (\text{III- 5})$$

Les caractéristiques $C_p(\lambda)$ des différentes valeurs β de l'angle d'inclinaison de la pale sont présentées dans la figure (III.7). La valeur maximale de $C_{p\max}=0,38$ est obtenue lorsque $\beta=2^\circ$ et $\lambda=8,9$. Le moment du vent est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{ear}}{\Omega_t} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \cdot C_p \right) \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{III- 6})$$

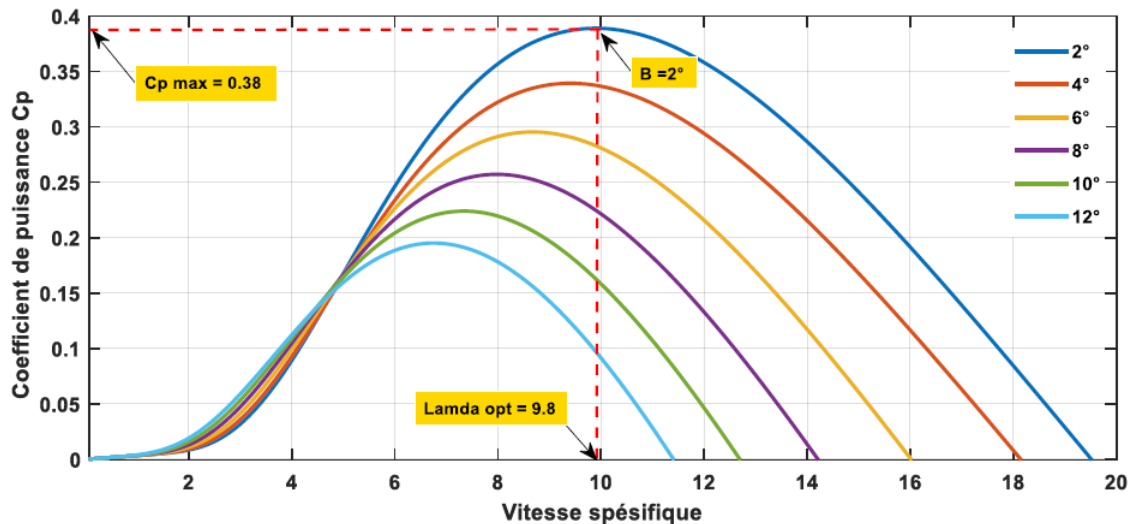


Fig III.7. Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique

III.10.2 Modèle de l'arbre.

Les équations dynamiques de base caractérisant le comportement mécanique des composants de la turbine et du générateur sont données par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{III- 7})$$

Avec : J est l'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur. Elle est donnée par :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g = J_t + J_g \quad (\text{III- 8})$$

Où

J_t : est l'inertie de la turbine, G : est le gain du multiplicateur, qui dans notre cas est égal à 1, J_g : est l'inertie du générateur. A noter que le moment d'inertie du générateur est négligeable par rapport à l'inertie de la turbine.

C_{mec} : est le couple mécanique, qui prend en compte : le couple C_g issu du multiplicateur, le couple électromagnétique C_{em} généré par le générateur, et le couple C_r issu du frottement visqueux.

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_r \quad (\text{III- 9})$$

Le couple de frottement est donné par :

$$C_r = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{III- 10})$$

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de cette turbine est issu des équations précédentes et est présenté à la Figure (III.8). [14][21][17]

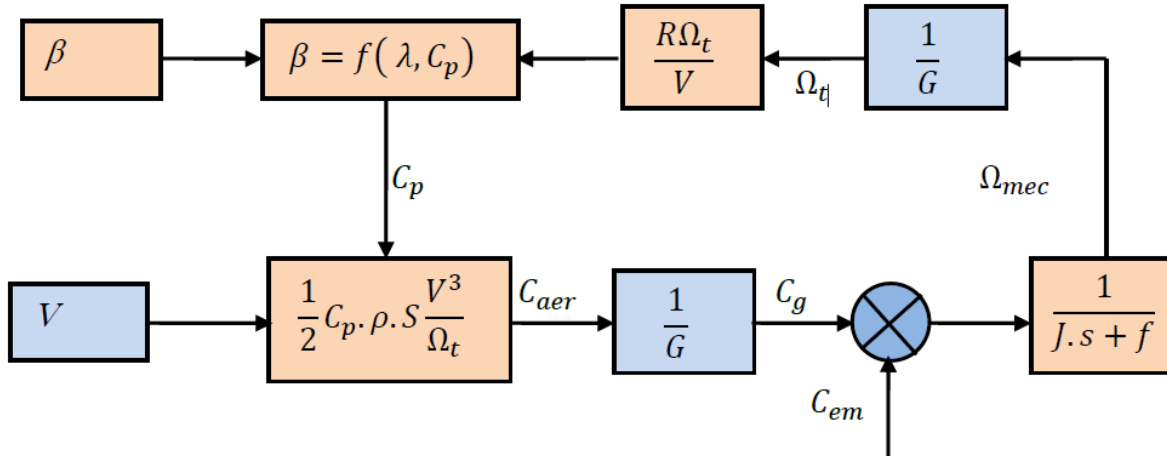


Fig III.8. Schéma bloc du modèle de la turbine.

Le schéma fonctionnel montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée en agissant sur deux entrées :

- Couple mécanique du générateur.
- Vitesse du vent.

L'angle d'orientation de la pale est considéré comme une entrée destructrice du système.

III.10.3 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents.

En raison des nombreux avantages de MSAP, nous sommes intéressés par son utilisation dans notre système. Généralement, le générateur synchrone à aimant permanent GSAP est modélisé à l'aide d'une source de tension à impédance série. Le circuit équivalent et le diagramme vectoriel sont présentés dans la figure (III.9).[17]

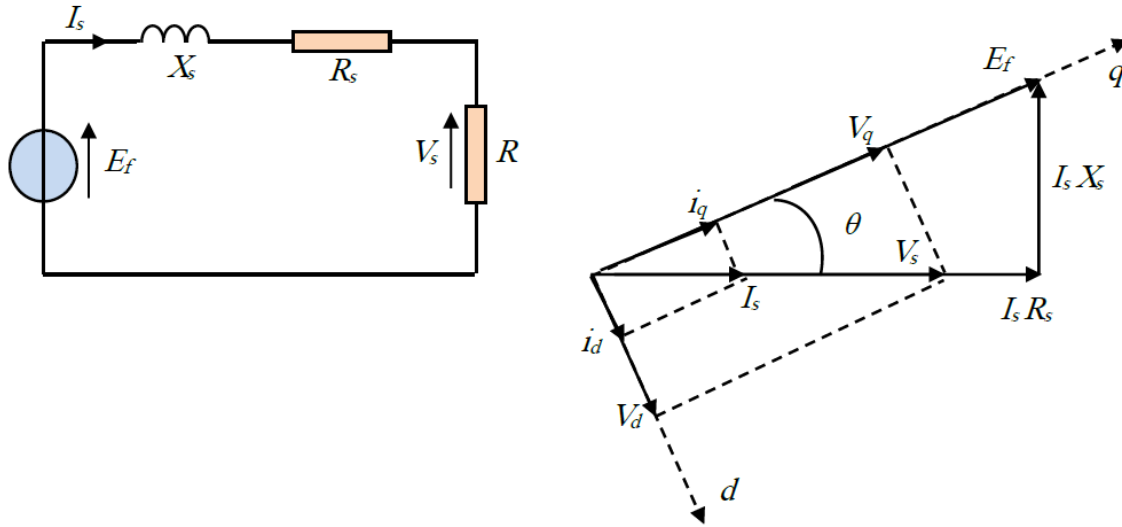


Fig III.9. Schéma équivalent du GSAP et le diagramme vectoriel associé.

Le modèle dynamique de la GSAP décrite dans le repère d'axe d-q donné par:[16][22]

$$\begin{cases} v_q = -R_s i_q - L_q s i_q - \omega_e L_q i_d + \omega_e \phi_e \\ v_d = -R_s i_d - L_d s i_d - \omega_e L_d i_q \\ C_{em} = \frac{3P}{2} (\phi_e i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \end{cases} \quad \text{(III- 11)}$$

avec :

L_q, L_d : sont l'inductance du stator sur l'axe d-q, S : est l'opérateur laplacien, et C_{em} est le couple électromagnétique. À l'aide de diagrammes vectoriels, l'équation (III- 23) peut être exprimée en termes de tension du générateur V_s comme suit :

$$\begin{cases} \frac{V_s i_q}{\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} = -R_s i_q - L_q s i_q - \omega_e L_q i_d + \omega_e \phi_e \\ \frac{V_s i_d}{\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} = -R_s i_d - L_d s i_d - \omega_e L_d i_q \end{cases} \quad \text{(III- 12)}$$

D'autre part, nous avons $L_d=L_q=L_s$, donc l'équation du couple électromagnétique (C_{em}) réduit à :

$$C_{em} = \frac{3P}{2} (\phi_e i_q) \quad (\text{III- 13})$$

et :

La tension aux bornes du MSAP peut être contrôlée en modifiant le cycle de service du boost.

La tension V_s est donc donnée par :

$$V_s = \frac{\pi V_{red} i_d}{3\sqrt{3}} S \quad (\text{III- 14})$$

Par conséquent, les équations (III- 24) peuvent être réécrites sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left(-R_s i_q - \omega_e L_s i_d + \omega_e \phi_e - \frac{V_{red} i_d}{3\sqrt{3} L_s \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} S \right) \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} \left(-R_s i_d + \omega_e L_s i_q - \frac{V_{red} i_d}{3\sqrt{3} L_s \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} S \right) \\ \frac{d\omega_e}{dt} = \frac{P}{2J} \left(C_{mec} - \frac{3P}{4} \phi_e i_q \right) \end{array} \right. \quad (\text{III- 15})$$

Parmi eux : i_d et i_q : sont respectivement les courants continu et secondaire du stator, ω_e : est la vitesse angulaire électrique, R_s et L_s sont respectivement : la résistance de phase et l'inductance du stator, P : est le nombre de pôles du générateur, J : est l'inertie du générateur, ϕ_e : est le flux d'aimant permanent par pôle, V_{red} : est la tension redressée, S : est le rapport cyclique du convertisseur boost.

III.11. Redresseur triphasé à diodes.

Étant donné que les GSAP génèrent des tensions à fréquence et amplitude variables, une électronique de puissance supplémentaire est nécessaire pour répondre aux demandes de la charge. Une méthode courante consiste à rectifier la tension de sortie, puis à traiter cette tension continue,

puis à l'utiliser comme tension d'entrée de l'onduleur. Dans cette étude, un pont de diodes triphasé est utilisé pour redresser la tension générée par le GSAP.[14]

Considérons le circuit constitué d'un pont de diodes sur la figure (III.10) ; supposons que le courant à la sortie du composant redresseur est continu (charge hautement inductive) et les diodes sont parfaites (commutation parfaite):

-Lorsque $V_1 > V_2 > V_3$, D_1 et D_3' conduisent $\rightarrow V_d = V_1 - V_3$.

-Lorsque $V_1 > V_3 > V_2$, D_1 et D_2' conduisent $\rightarrow V_d = V_1 - V_2$.

-Lorsque $V_2 > V_1 > V_3$, D_2 et D_3' conduisent $\rightarrow V_d = V_2 - V_3$.

-Lorsque $V_2 > V_3 > V_1$, D_2 et D_1' conduisent $\rightarrow V_d = V_2 - V_1$.

-Lorsque $V_3 > V_1 > V_2$, D_3 et D_2' conduisent $\rightarrow V_d = V_3 - V_1$.

-Lorsque $V_3 > V_2 > V_1$, D_3 et D_1' conduisent $\rightarrow V_d = V_3 - V_2$.

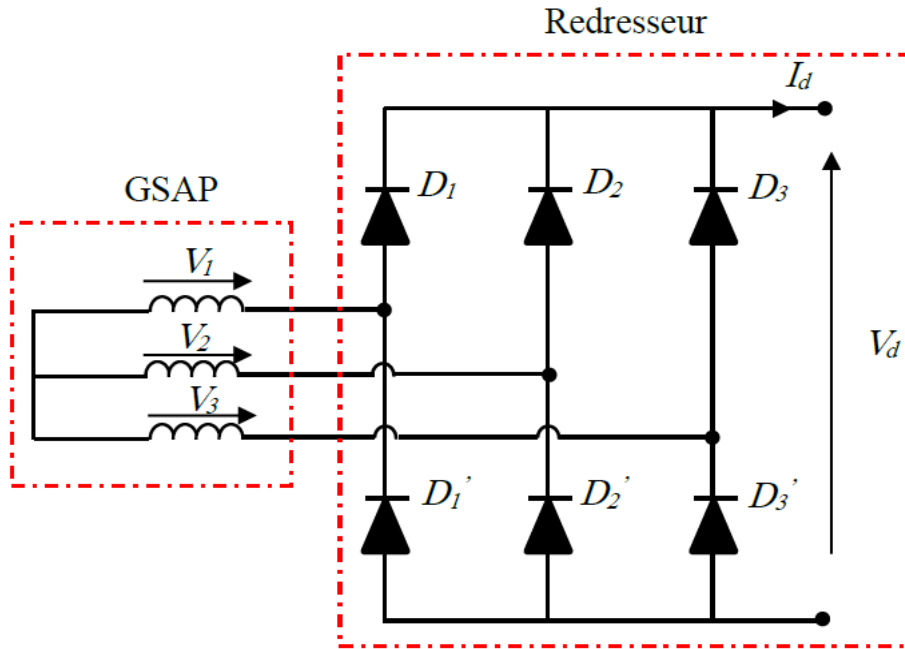


Fig III.10. Pont redresseur de diode triphasé.

Par conséquent, chaque diode conduit pendant un tiers de la période et la tension redressée est constituée de six parties de l'onde sinusoïdale pour chaque période T. Sur la figure (III.11), nous représentons l'apparition de la tension redressée Vd.[22][23]

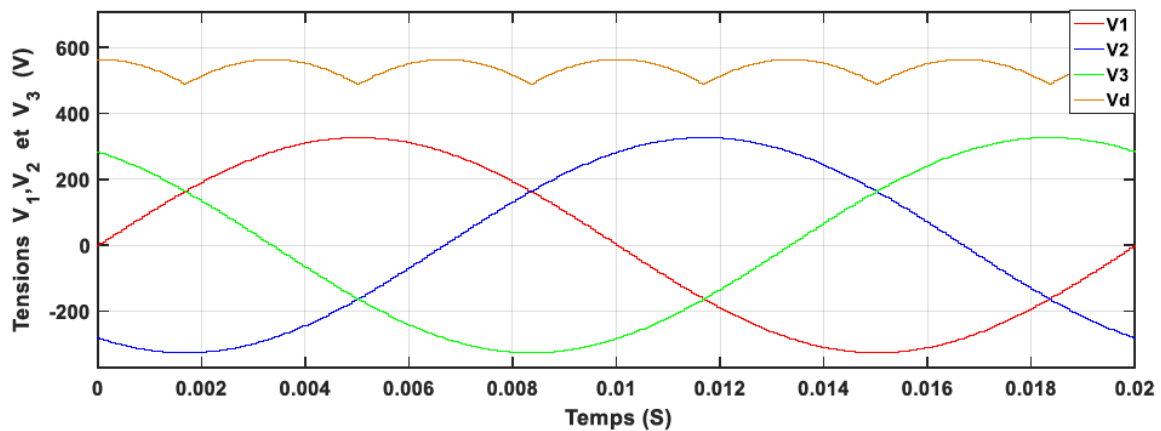


Fig III.11. Allure de la tension redressée.

Nous supposons que l'alimentation et le redresseur sont parfaits, et que la tension redressée V_d est périodique de période $T/6$. Entre 0 et $T/6$, l'expression de cette tension est :

$$V_d = V_s \sqrt{2} \cos(\omega t) \quad (\text{III- 16})$$

Où V_s est la valeur efficace de la tension d'entrée. Les composants n'étant pas parfaits, cela se traduira par une valeur plus faible de la tension redressée V_d . Cette chute peut être ignorée.

Dans ce cas nous avons :

$$\langle V_d \rangle = \frac{1}{\left(\frac{T}{6}\right)}, \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} V_d dt = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{GSAP} \quad (\text{III- 17})$$

$$\langle I_d \rangle = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_{GSAP} \quad (\text{III- 18})$$

Son facteur d'ondulation est donné par :

$$K\% = \frac{V_{d \max} - V_{d \min}}{2 \cdot \langle V_d \rangle} = 7\% \quad (\text{III- 19})$$

Où $\langle V_d \rangle$ et $\langle I_d \rangle$ sont les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie du redresseur, V_{GSAP} et I_{GSAP} sont les valeurs efficaces de la tension fondamentale et du côté AC.

III.12. Modélisation du bus continu

En général, dans le domaine de la modélisation, le bus continu est souvent perçu comme une capacité. Après avoir décrit tous les modèles élémentaires, nous avons procédé à l'interconnexion des sources en fonction de la configuration du bus continu. La puissance fournie par chaque source est regroupée sur le bus à courant continu, comme illustré dans la figure (III.12).[17]

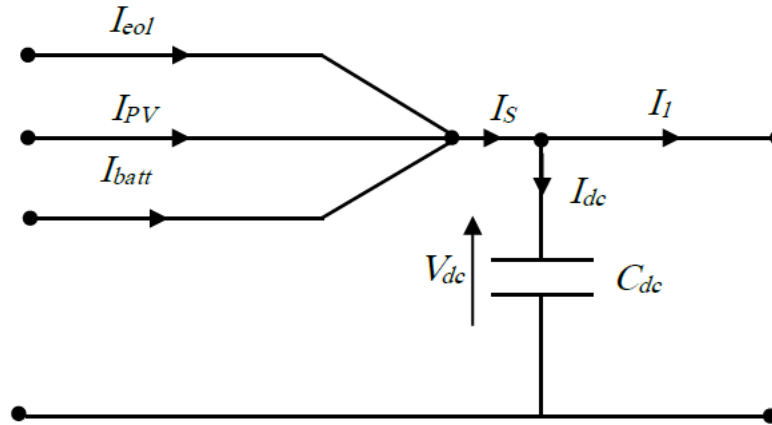


Fig III.12. Modèle du bus continu.

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{III- 20})$$

$$I_{dc} = I_{PV} + I_{eol} + I_{batt} - I_1 \quad (\text{III- 21})$$

Parmi eux : I_{PV} : est le courant du système photovoltaïque, I_{eol} : est Courant du système éolien, I_{batt} : est le courant de charge/décharge de la batterie, I_1 : est le courant de l'onduleur.

III.13. Algorithme MPPT pour le système éolien.

La courbe de puissance d'une éolienne dépend de ses paramètres, des conditions atmosphériques ainsi que la vitesse de rotation du rotor. Contrairement au fonctionnement à vitesse fixe, qui ne peut fonctionner qu'en un point fixe de ces courbes (ce qui est rarement le point optimal), le fonctionnement à vitesse variable permet de sélectionner le point de fonctionnement en ajustant la vitesse du rotor. Si cette vitesse est réglée à une valeur optimale, la puissance de l'éolienne est maximale. C'est pourquoi le contrôle du suivi PPM est essentiel dans les éoliennes à vitesse variable. Le contrôle du maximum de puissance d'une éolienne repose sur la relation entre la vitesse de rotation du rotor et la puissance produite. Le système de contrôle utilise cette relation

pour définir la puissance maximale disponible pour chaque vitesse du vent et fait varier la vitesse du rotor pour minimiser la différence entre cette puissance maximale et la puissance produite. Dans une éolienne couplée à un GSAP, afin de modifier la vitesse du rotor, la tension de sortie du GSAP peut être ajustée comme suit.[17]

Il existe deux structures de commande MPP pour les systèmes éoliens : les méthodes indirectes et les méthodes directes

III.13.1. Méthodes directes

Les méthodes directes sont indépendantes de la connaissance des courbes de puissance et de la vitesse du vent. Ils s'appuient sur des études extrêmes appliquées avec succès aux systèmes photovoltaïques (méthode P&O, méthode Hill Climbing, ect...). Cependant, le processus de conversion de l'énergie éolienne est plus complexe en raison de la nature stochastique du vent, de l'aérodynamique complexe et du comportement non linéaire des générateurs et des systèmes électriques. L'application de ces méthodes aux systèmes de conversion de l'énergie éolienne nécessite donc des modifications et des adaptations.[22]

III.13.2. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes de contrôle des éoliennes se basent sur la courbe de puissance de l'éolienne. En analysant cette courbe, il est possible de déterminer la vitesse optimale en fonction de la vitesse du vent et de commander le rotor pour suivre cette vitesse optimale. Dans cette approche, on distingue deux structures de commande.

- a) Contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- b) Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique

Dans notre modèle d'éolienne, nous supposons que les caractéristiques de la turbine sont bien définies et nous choisissons d'utiliser le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique. Un contrôleur MPPT est implémenté pour optimiser la puissance de sortie de l'éolienne en ajustant le rapport cyclique du convertisseur boost, comme illustré à la figure (III.13).

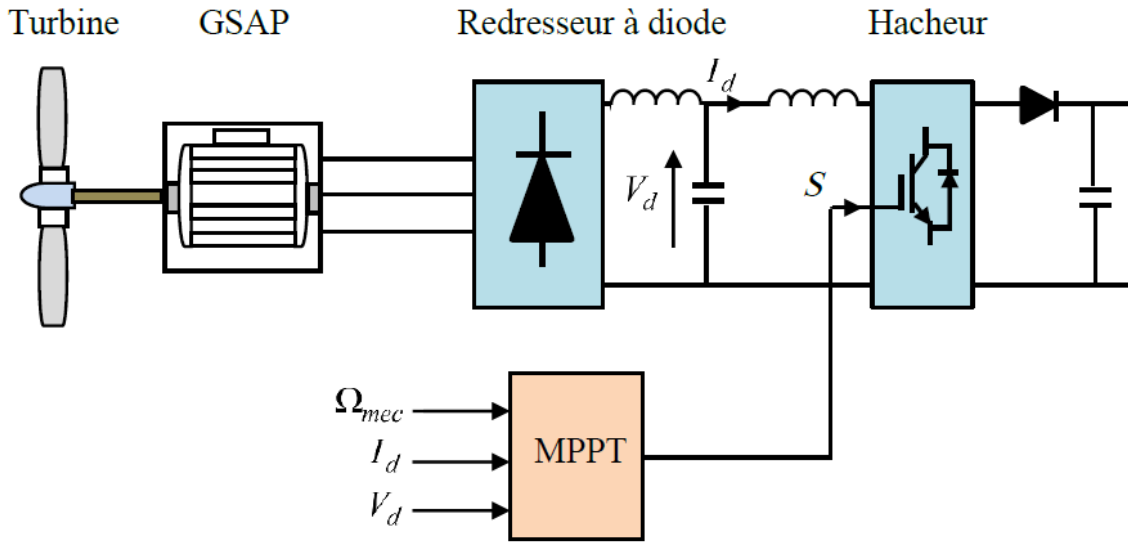


Fig III.13. Structure de contrôle d'une turbine éolienne

Cette méthode de contrôle repose sur l'hypothèse que, en régime stationnaire, on peut ignorer les variations de la vitesse du vent ainsi que la vitesse de rotation de la turbine. [24] Par conséquent, le couple mécanique appliqué à l'arbre devient négligeable.[17]

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = C_G - C_{em} - C_r = 0 \tag{III- 22}$$

En négligeant l'effet du couple résistant dû aux frottements visqueux $C_r \approx 0$, nous obtenons :

$$C_{mec} = C_G - C_{em} = 0 \Rightarrow C_G = C_{em} \tag{III- 23}$$

Et nous avons :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_G} \Rightarrow C_G = \frac{C_{aer}}{G} \tag{III- 24}$$

Notons que $G=1$, donc l'équation (III- 36) devient :

$$C_{aer} = C_{em} \tag{III- 25}$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = C_{aer-ref} \quad (\text{III- 26})$$

Le couple aérodynamique estimé, est déterminé par l'expression :

$$C_{aer-est} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{est}^3 \cdot C_P \right) \cdot \frac{1}{\Omega_{t-est}} \quad (\text{III- 27})$$

Une estimation de la vitesse de la turbine est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique:

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \Rightarrow \Omega_{t-est} = \Omega_{mec} \quad (\text{III- 28})$$

L'estimation de la vitesse du vent peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III- 29})$$

En utilisant les expressions du (III- 39) au (III- 41), nous obtenons :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_P}{\lambda^3} \Omega_{mec}^2 \quad (\text{III- 30})$$

Nous en déduisons qu'au point de puissance maximale, cette expression s'écrit :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{P \max}}{\lambda_{opt}^3} \Omega_{mec}^2 \quad (\text{III- 31})$$

En posant :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{P \max}}{\lambda_{opt}^3} \quad (\text{III- 32})$$

L'expression (III- 44) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (\text{III- 33})$$

La figure (III.14) illustre le circuit de contrôle du convertisseur boost dans le système éolien. Le courant de référence I_{d-ref} est calculé à partir du couple C_{em-ref} et de la tension redressée V_d . La formule suivante est utilisée à cet effet.[25]

$$I_{d-ref} = \frac{C_{em-ref} \cdot \Omega_{mec}}{V_d} \quad (\text{III- 34})$$

Nous comparons le courant redressé réel I_d au courant de référence I_{d-ref} . L'erreur résultant de cette comparaison est envoyée à un bloc à hystérésis pour générer le signal de commutation, déterminant ainsi l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur du convertisseur boost.

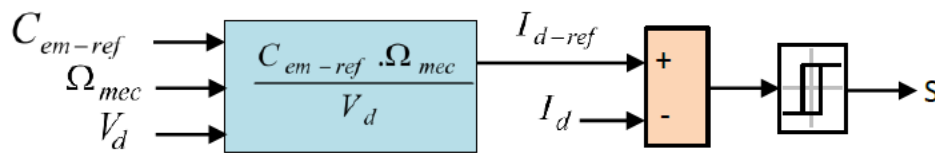


Fig III.14. Circuit de contrôle de l'hacheur élévateur

III.14. Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements.

Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les applications des machines électriques, ainsi que les avantages et les inconvénients à un système éolien et la modélisation du système éolienne.

Enfin, la modélisation détaillée de la turbine éolienne, ainsi que le générateur synchrone à aimants permanents, et d'un convertisseur DC/DC graduel. Par la suite, dans le but d'extraire le maximum d'énergie du vent à tout moment, la commande MPPT a été introduit dans le système de conversion éolienne.

Références :

- [1] A. Benamor, “Contribution à la Modélisation, à la Commande et au Contrôle des Systèmes de Production de l’Energie Électrique Renouvelable.” Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [2] M. BEN KHELIFA and A. BENATIALLAH, “l’étude et la conception du montage d’une ferme éolienne dans un milieu saharien.” Université de Adrar, 2015.
- [3] M. S. Rouabah and Z.-L. Mahri, “Etude dynamique et optimisation des pales d’un aerogenerateur”. Université de Frère Mentouri Constantine, 2007.
- [4] K. Ferkous, “Etude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne,” mémoire magister, Univ. mentouri Constantine, vol. 18, 2009.
- [5] F. Merrahi, “Alimentation et commande d’une machine asynchrone à double alimentation (Application à l’énergie éolienne).” Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [6] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau.” Université de Nantes, 2003.
- [7] M. HADJ BELKACEM, H. HINOUNI, and S. BENTOUBA, “ETUDE D’IMPACT DES FLUCTUATIONS DE LA PRODUCTION DE LA CENTRALE EOLIENNE KABERTENE SUR LE RESEAU ELECTRIQUE D’ADRAR.” Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [8] A. LAKHDARA, “Contribution à la gestion d’énergie dans un système hybride à énergies renouvelables.” Université de Guelma, 2022.
- [9] T. Azzouz, “Modélisation et commande d’un système de conversion d’énergie éolienne à base d’une MADA.” Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [10] N. Hamdi, “Modélisation et commande des génératrices éoliennes,” Mem. Magister, Univ. Mentouri Constantine, 2008.
- [11] H. B. Houda, “Modélisation, simulation et optimisation d’un système hybride éolien photovoltaïque,” Mem. magister, université de Ghardaia, 2010.

- [12] A. K. Traoré, “Gestion d’un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles.” Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [13] M. BENCHERIF, “Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension.” Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2014.
- [14] B. Benlahbib, “Supervision d’un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique.”Thèse de doctorat, université de Boumediane, 2019.
- [15] N. H. Samrat, N. Ahmad, I. A. Choudhury, and Z. Taha, “Technical study of a standalone photovoltaic–wind energy based hybrid power supply systems for island electrification in Malaysia,” PLoS One, vol. 10, no. 6, p. e0130678, 2015.
- [16] B. Mohcene, “Commandes non linéaires des systèmes photovoltaïques.” GUELMA, 2017.
- [17] B. Madaci, R. Chenni, and K. E. Hemsas, “Architectures intégrées de gestion de l’énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs.” Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2018.
- [18] J. G. Sloopweg, S. W. H. De Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, “General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations,” IEEE Trans. power Syst., vol. 18, no. 1, pp. 144–151, 2003.
- [19] L. Zarour and A. Bouzid, “Etude technique d’un système d’énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau,” Université de Frère Mentouri-Constantine, 2010.
- [20] B. Sharma, R. Dahiya, and J. Nakka, “Effective grid connected power injection scheme using multilevel inverter based hybrid wind solar energy conversion system,” Electr. Power Syst. Res., vol. 171, pp. 1–14, 2019.
- [21] A. Ben Jemaa, “Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d’une installation hybride.” Reims, 2015.
- [22] A. Borni and R. Chenni, “Etude et optimisation d’un multi système hybride de conversion d’énergie électrique,” Université de Frère Mentouri-Constantine, 2015.

[23] R. SADOUNI, “Commande directe du couple (DTC-SVM) d’une MASDE associée à Deux Onduleurs Multiniveaux en Cascade avec un Redresseur à MLI Piloté par DPC.” Université de Sidi Bel Abbès,2017.

[24] A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance.” Université de Toulouse,2005.

[25] M. E. Haque, M. Negnevitsky, and K. M. Muttaqi, “A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator,” in 2008 IEEE industry applications society annual meeting, IEEE, 2008, pp. 1–8.

CHAPITRE IV :

Simulation et discussion des résultats

IV.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter un système hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable : le générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie solaire et le générateur éolien pour convertir l'énergie éolienne. Ce système hybride utilise l'énergie éolienne et solaire pour fournir de l'électricité aux zones isolées où la connexion au réseau électrique est coûteuse et peu rentable. En l'absence de soleil et de vent, des batteries sont utilisées pour assurer l'alimentation en énergie. L'intégration d'une unité de contrôle PID dans un convertisseur Buck-Boost, ainsi que sa connexion à une charge variable via un onduleur NPC triphasé, représente une solution innovante et intelligente pour l'énergie renouvelable.

En combinant de manière synergique des stratégies de contrôle avancées, des capacités de stockage d'énergie et une conversion d'énergie efficace, ce système aborde les défis de l'intermittence et des fluctuations des demandes énergétiques, ouvrant la voie à un avenir énergétique plus propre, plus durable et plus fiable. Ce chapitre fournira des considérations de conception, des stratégies de contrôle et des résultats de ce système hybride innovant, offrant des perspectives précieuses sur son application dans le monde réel et la possibilité d'adopter largement l'énergie renouvelable.

Enfin, nous présenterons les résultats de ce système hybride innovant, fournissant des insights précieux sur son application dans le monde réel et la possibilité d'adopter largement l'énergie renouvelable.

IV.2. Description du système.

Le système d'énergie hybride illustré dans la figure IV.1 combine des panneaux solaires photovoltaïques et des générateurs éoliens connectés à un stockage de batterie avec des unités de contrôle PID (proportionnelle-intégrale-dérivée) pour réguler la tension. Une unité de contrôle P&O est utilisée pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) dans le système photovoltaïque. Un onduleur triphasé à trois niveaux est assuré entre le NPC et la charge DC. L'objectif du système est d'améliorer l'utilisation de l'énergie, de renforcer la stabilité et d'optimiser les performances globales.

Les sections suivantes approfondiront la méthodologie, les considérations de conception, les stratégies de contrôle et les résultats de ce système hybride innovant, fournissant des perspectives précieuses sur son application dans le monde réel et la possibilité d'adopter largement l'énergie renouvelable.

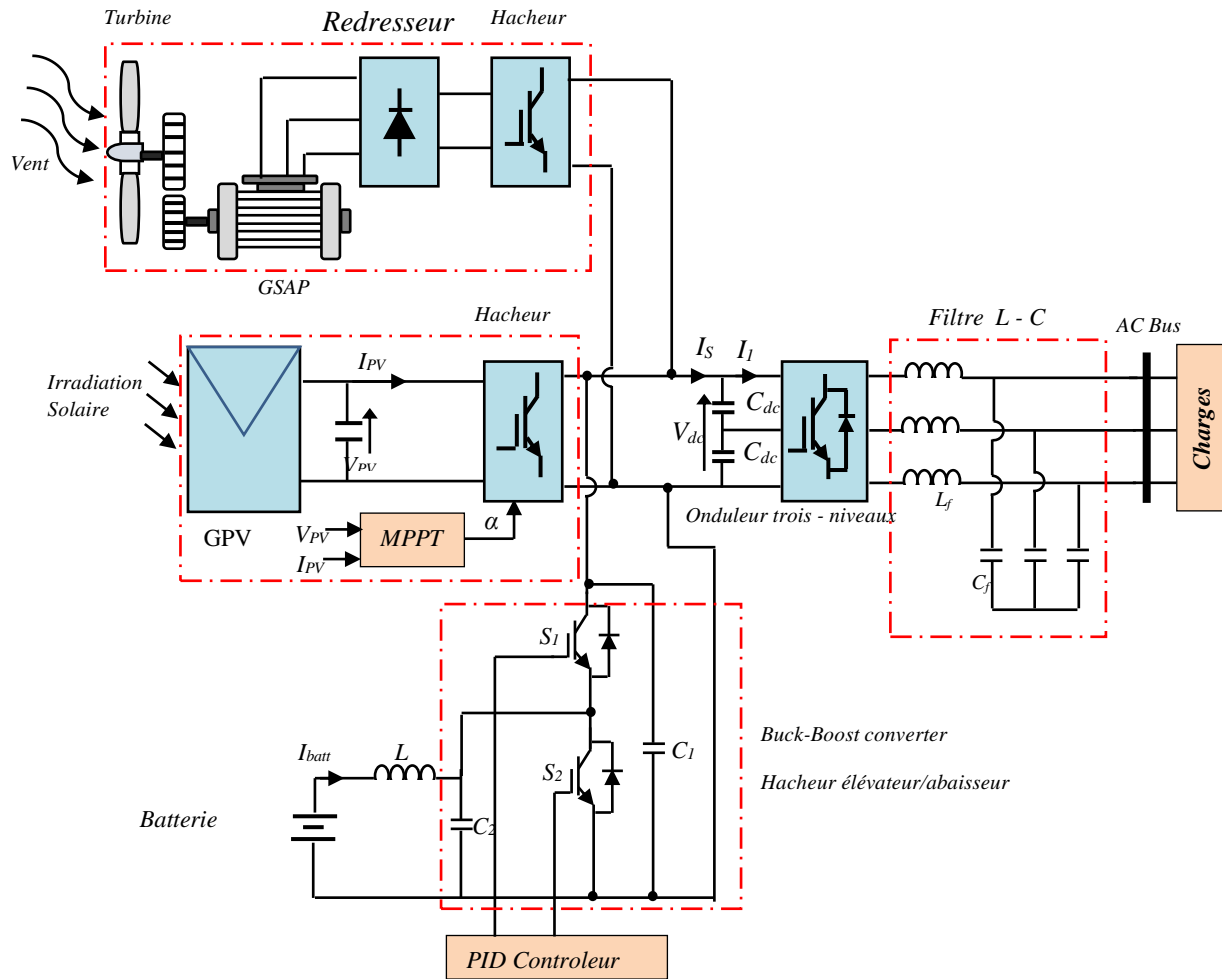


Fig IV.1 Le système énergétique hybride

IV.3. Simulation et discussion des résultats

Dans cette section, la boucle de contrôle est mise en œuvre dans le logiciel Matlab/Simulink avec un temps d'échantillonnage de $T_s = 10^{-5}$ s. Les valeurs numériques des systèmes

photovoltaïques, des générateurs éoliens, des systèmes de batteries et du MSAP sont respectivement résumés dans les Tableaux IV.1, IV.2, IV.3 et IV.4.

Tab IV.1 Paramètres du tableau PV Array

Composants	Valeurs de notation
Type de module	Sanyo HIP-225HDE1
Number de cellules	60
Module série	06
Module parallèle	06
V_{oc} , I_{sc} , V_{mmp} , I_{mmp}	41.79V, 7.13A, 33.9V, 6.63A
R_s , R_p , I_{soat} , I_{ph} ,	00.204 Ω , 1830.7 Ω , 3.0815e-07A, 7.145A,

Tab IV.2 Paramètres de la batterie

Composants	Valeurs de notation
Type de batterie	Lead-Acid
Tension nominal	300 V
Capacité nominale	6.5 Ah
État de charge initial	60%

Tab IV.3 Paramètres du générateur éolien

Composants	Valeurs de notation
Puissance mécanique nominale	8.5 KW
Densité de l'air	1.225 Kg/m ³
Zone balayée	1.06 m ²
Vitesse du vent nominal	12 m/s

Tab IV.4 Paramètres MSAP

Composants	Valeurs de notation
Nombre de phases	3
Paires de bâtons	5
Inductance [L_d L_q]	[0.0082 H 0.0082H]
Vitesse nominale	153 rad/sec
Résistance statorique	0.425 Ω
Flux efficace	0.433 W_b
Type de rotor	Salient pole

La fonction pidtool (Tunner) de Matlab est appliquée pour déterminer les trois paramètres du contrôleur PID.

Les valeurs optimales obtenues pour le PID sont $K_P = 2$, $K_I = 390.02$, et $K_D = 0.0732$.

Les profils de rayonnement solaire, de vitesse du vent et de charge appliquée utilisés dans notre simulation sont illustrés respectivement dans les Figures IV.2, IV.3 et IV.4.

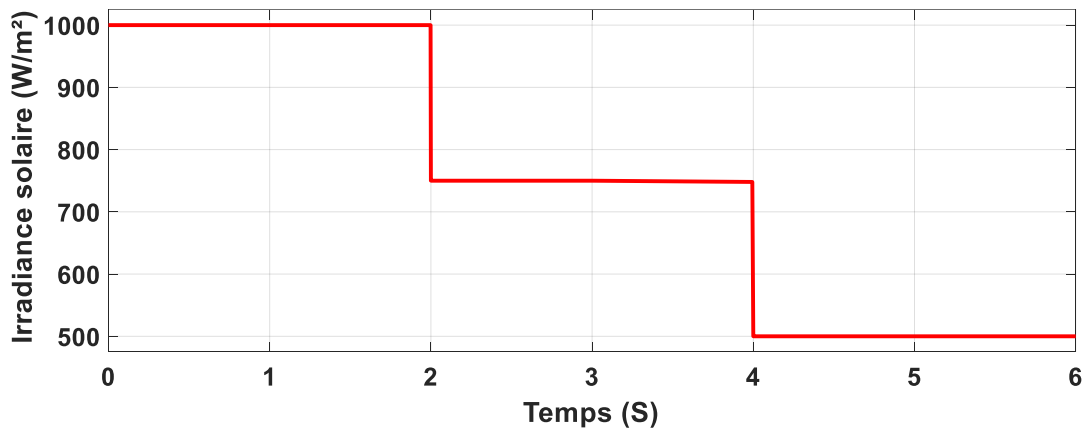
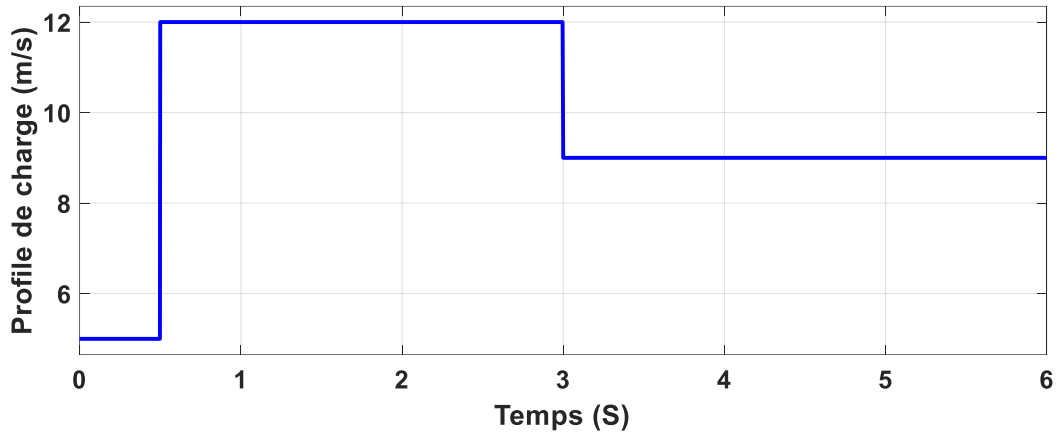
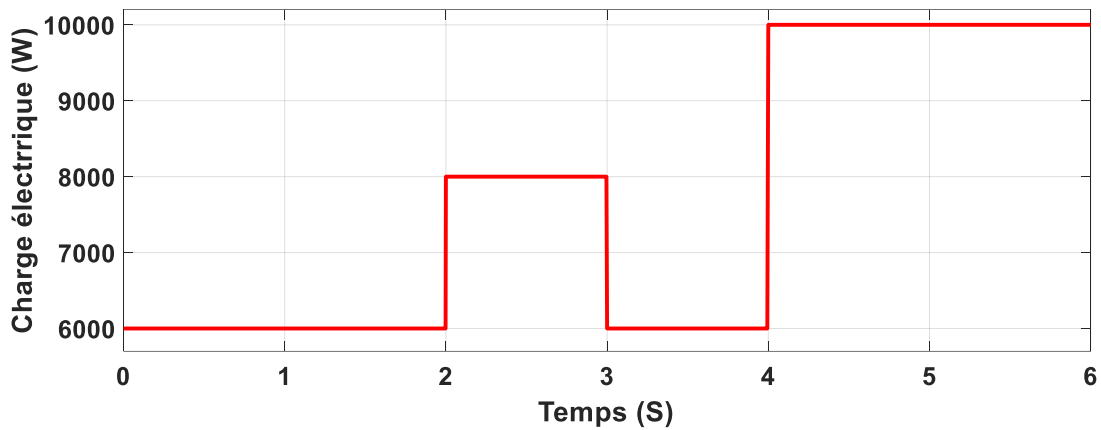


Fig IV.2 Variations d'irradiance solaire**Fig IV.3** Eolienne à vitesse variable**Fig IV.4** Charge électrique

La Figure IV5 présente la tension du bus DC ainsi que les deux tensions V_{dc1} et V_{dc2} obtenues avec un contrôleur PID. La tension V_{dc} montrée est la somme des deux tensions V_{dc1} et V_{dc2} et demeure pratiquement constante.

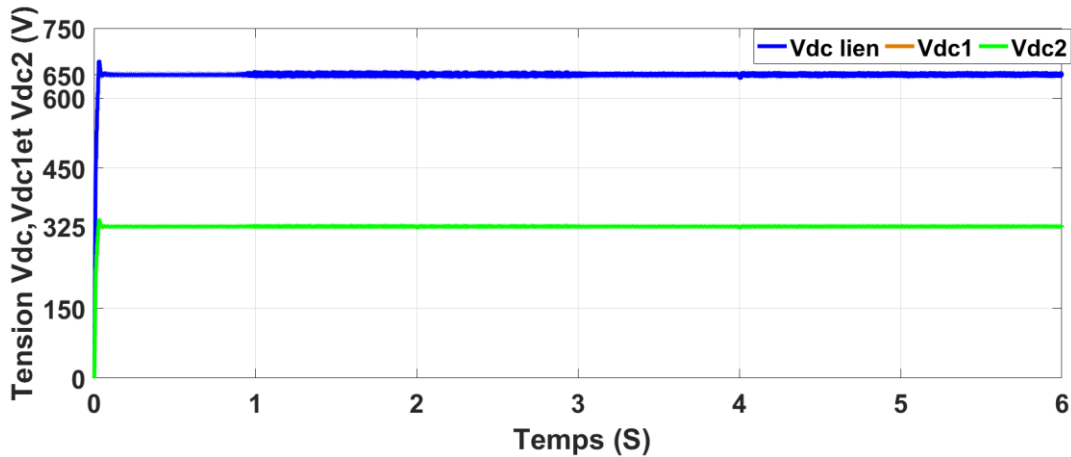


Fig IV.5 Tension V_{dc}, V_{dc1} et V_{dc2}

La Figure IV.6 fournit un résumé des puissances générées par les différents composants constituant le système hybride PV/éolien connecté à la batterie, superposées sur le même graphique.

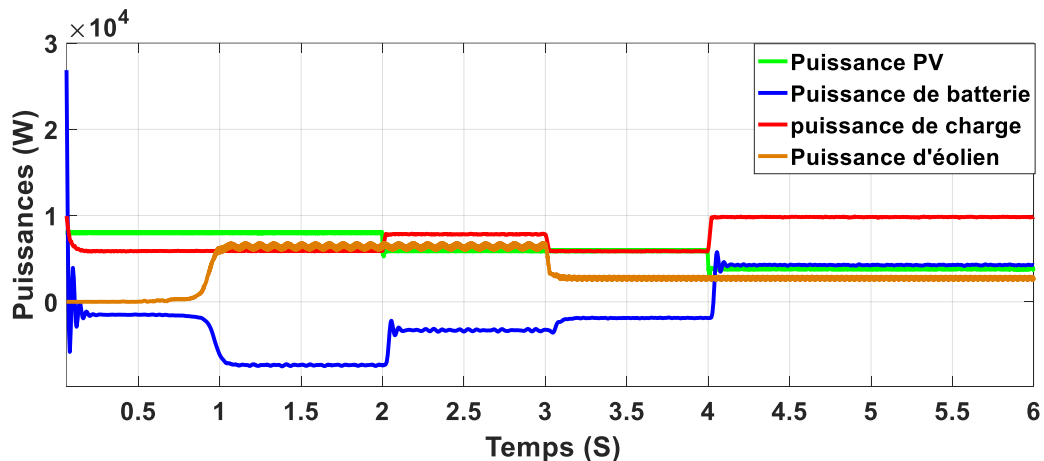


Fig IV.6 Puissances du système d'énergie hybride

Selon la Figure IV.5, on peut clairement observer que les réponses de la tension du Bus DC et le contrôle résultant donné par le contrôleur PID sont meilleurs. De plus, il ressort de la Figure IV.6 que la sortie du contrôleur BBC est très satisfaisante car la puissance du banc de batteries change (charge/décharge) pour maintenir l'équilibre de la puissance du système sous diverses conditions d'irradiance, de vitesse de l'éolienne et de charge. En réalité, si la puissance de la charge AC est supérieure à la puissance produite par le système PV/éolien, le contrôleur BBC est programmé pour décharger la puissance de la batterie dans la charge AC. En outre, le contrôleur est également

capable de charger la batterie lorsque la puissance de la charge est inférieure à la puissance produite par le système PV/éolien.

L'état de charge (SOC) montré dans la Figure IV.7, est de 77.8 % au début puis il diminue en régime transitoire avant d'augmenter jusqu'à 4 secondes (mode de charge). Ensuite, il se décharge jusqu'à 6 secondes (mode de décharge).

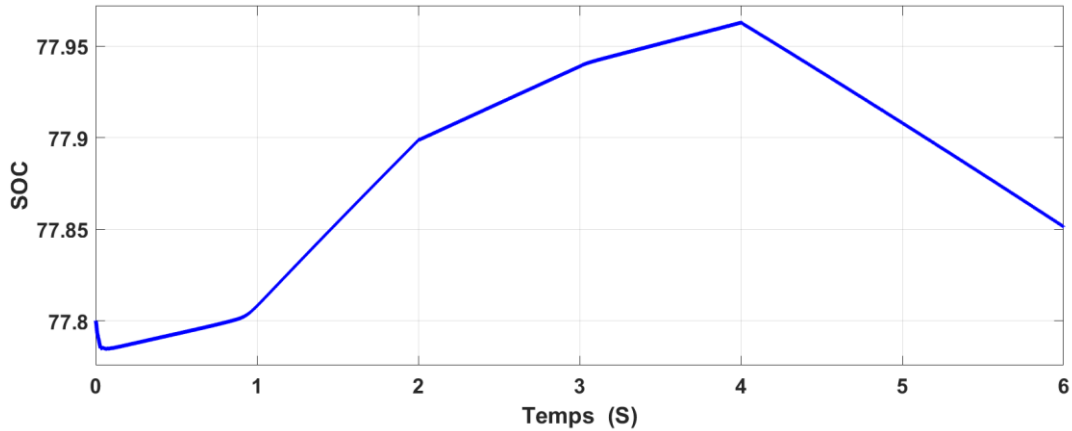


Fig IV.7 Batterie SOC

Les Figures IV.8 et IV.9 représentent les formes d'onde du courant et de la tension du stockage de la batterie. Lorsque la batterie est en mode de charge entre 0 et 4 secondes, sa tension augmente tandis que son profil de courant est inverse, et vice versa.

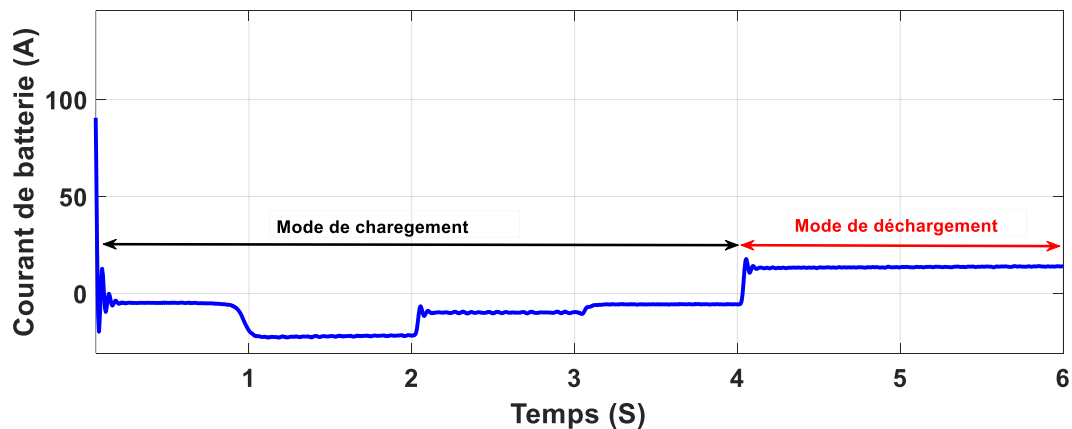
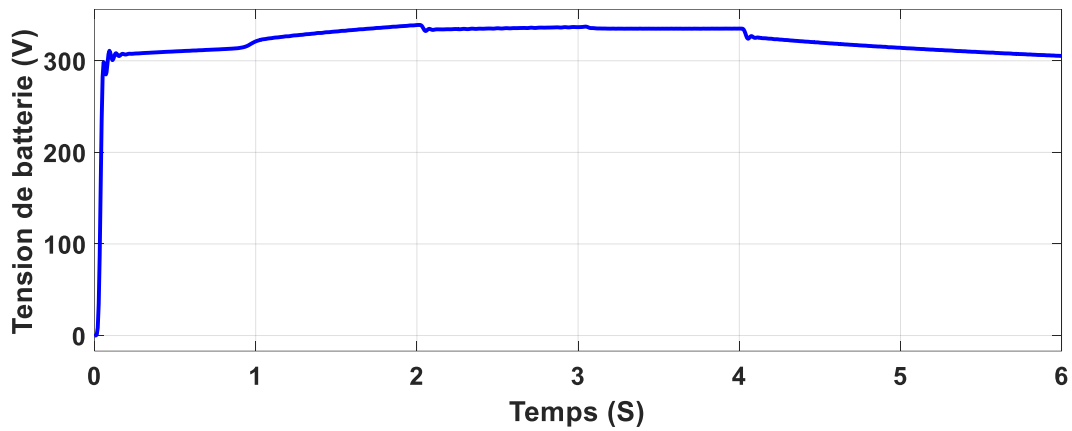
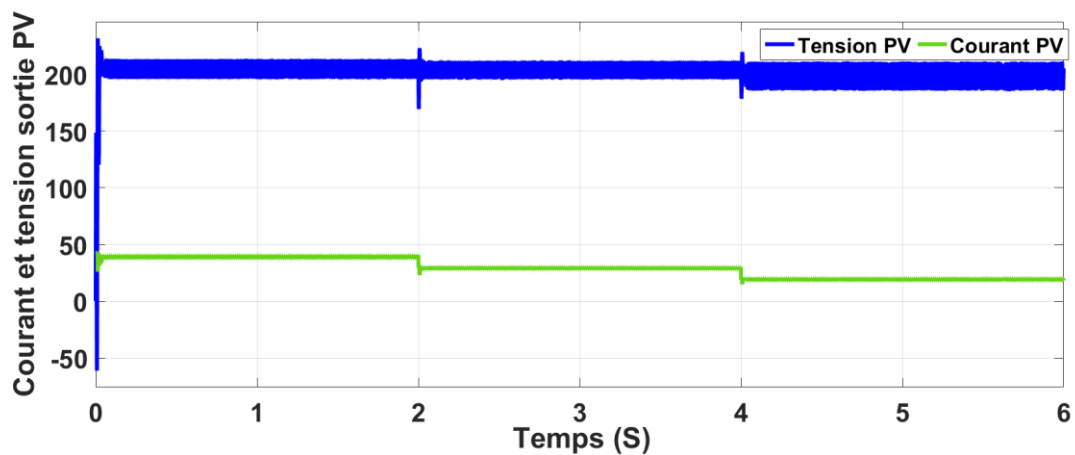


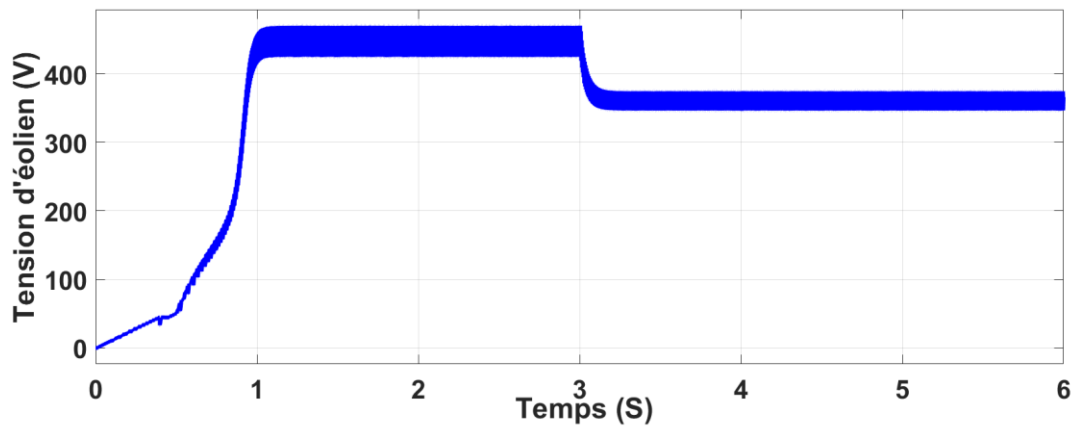
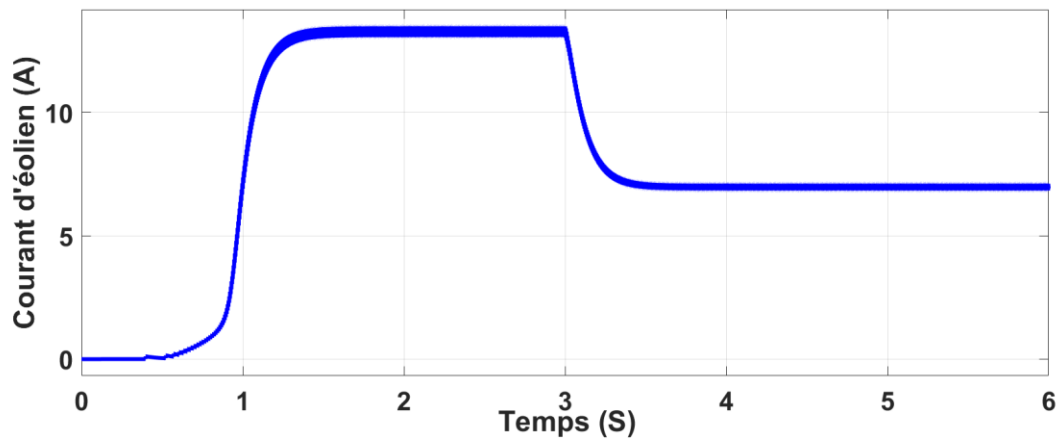
Fig IV.8 Courant de la batterie

**Fig IV.9** Tension de la batterie

La Figure IV.10 représente le courant et la tension du GPV pendant toute la période opérationnelle.

**Fig IV.10** Courant et tension du panneau solaire photovoltaïque

Basés sur les résultats de la simulation, nous observons que le courant du GPV exprime l'irradiance solaire, tandis que la tension reste presque constante. Les figures IV.11 et IV.12 ci-dessous représentent, respectivement, la tension de sortie et le courant de l'éolienne.

**Fig IV.11** Tension de sortie d'éolien**Fig IV.12** Courant de sortie d'éolien

La vitesse de rotation de la turbine, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance C_p sont présentés dans les figures suivantes.

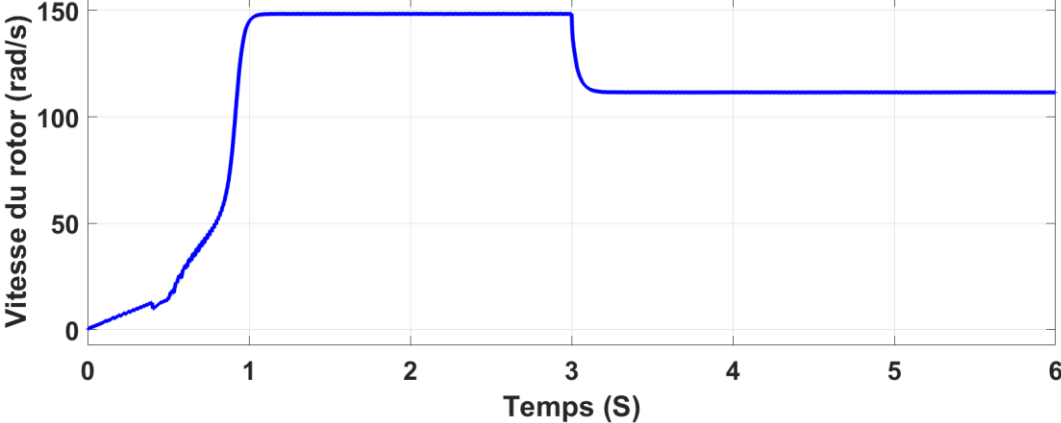


Fig IV.13 Vitesse du rotor

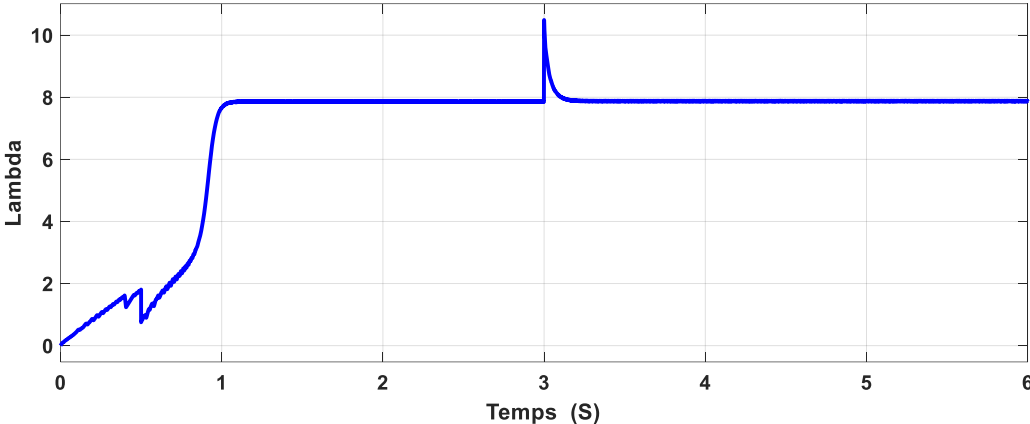
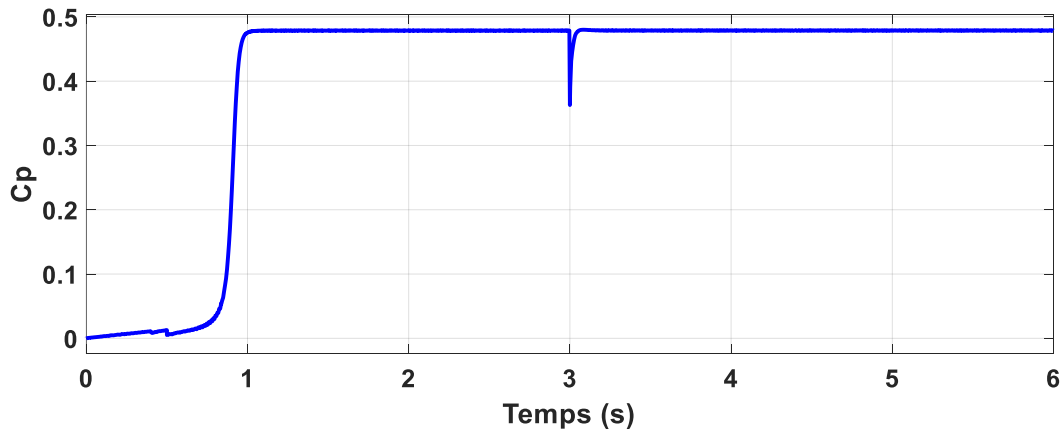
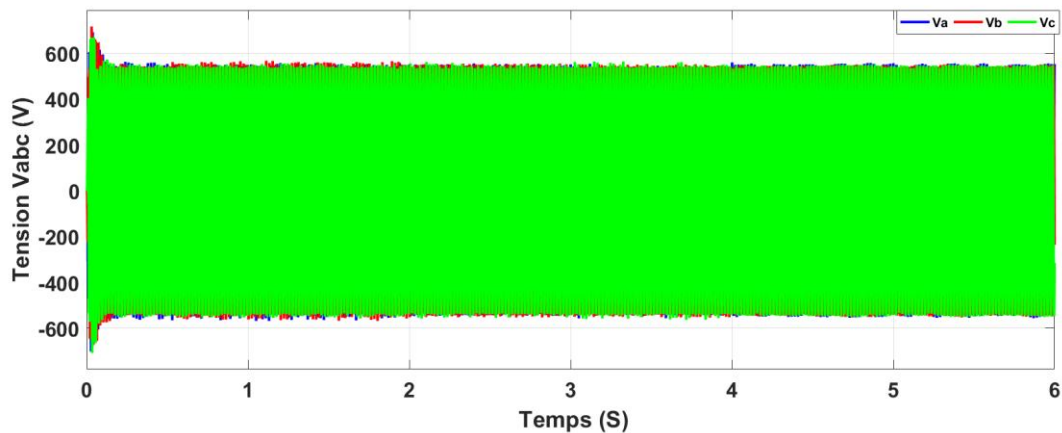


Fig IV.14 Vitesse spécifique

**Fig IV.15** Coefficient de puissance C_p

Les résultats de la simulation démontrent clairement l'adaptation de la vitesse de rotation et de la puissance de sortie aux variations de la vitesse du vent. Cela est confirmé par la vitesse spécifique, qui est bien ajustée à sa valeur optimale de 7,9, correspondant à un coefficient de puissance C_p de 0,479. Les Figures IV.16 et IV.17 affichent les formes d'onde de la tension de sortie de charge V_{abc} et se concentrent sur une petite période (de 1 s à 1,1 s). La tension de charge V_a et son analyse spectrale sont présentées dans la Figure IV.18.

**Fig IV.16** Tension de sortie de la charge

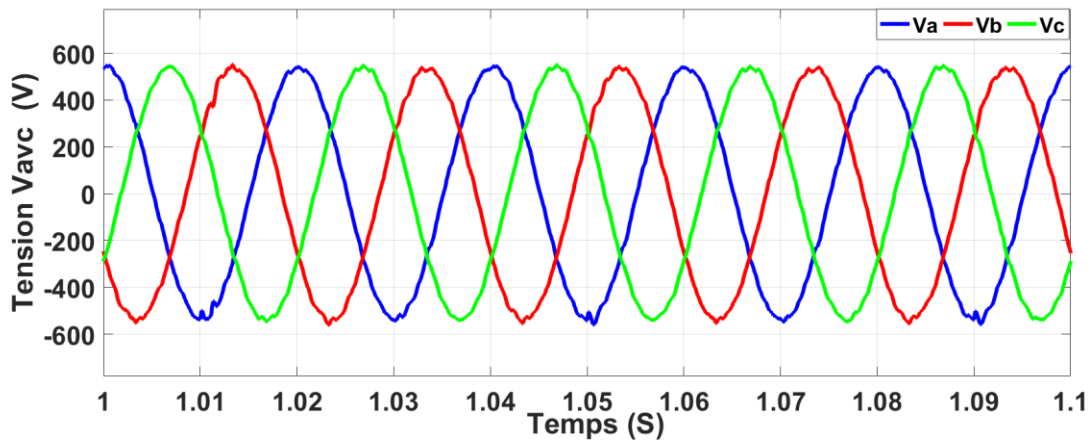


Fig IV.17 Zoom de la tension de sortie

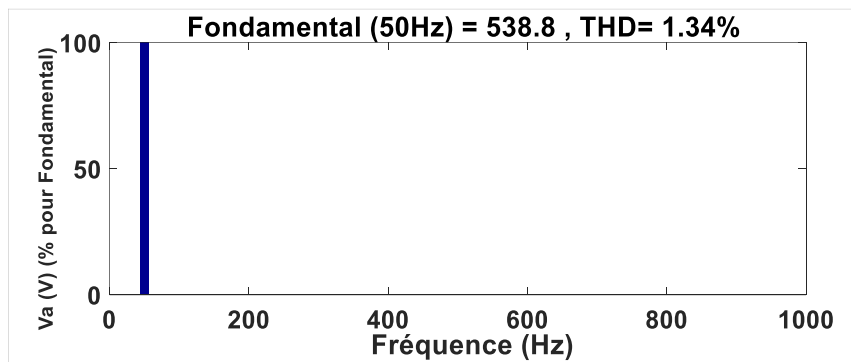


Fig IV.18 Harmoniques de la tension sinusoïdale

L'analyse spectrale de la tension de charge découvre que les formes d'onde sont déformées et présentent un taux de distorsion harmonique acceptable ($\text{THD}=1,34\% < 5\%$).

La Figure IV.19 représente la forme d'onde du courant i_{abc} du côté de la charge. Il y a également un zoom sur une courte période (de 1 s à 1,1 s), comme illustré dans la Figure IV.20.

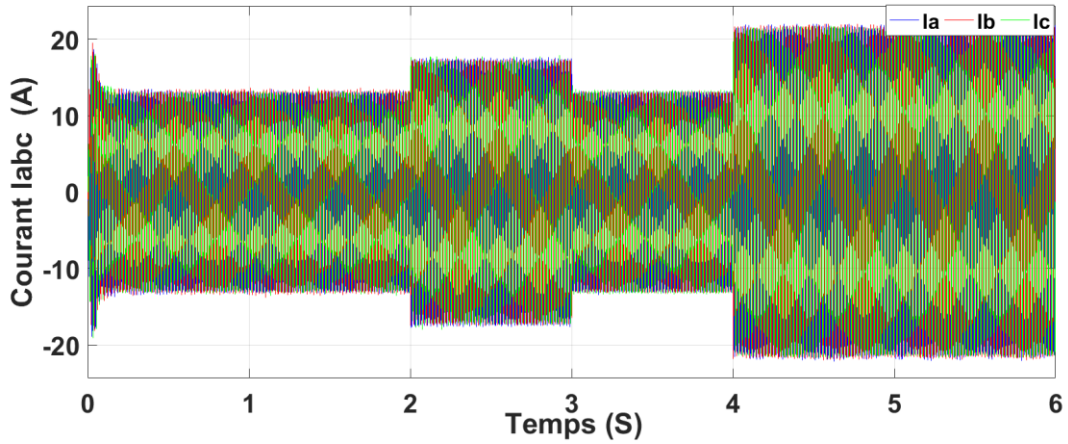


Fig IV.19 Courant de sortie de la charge

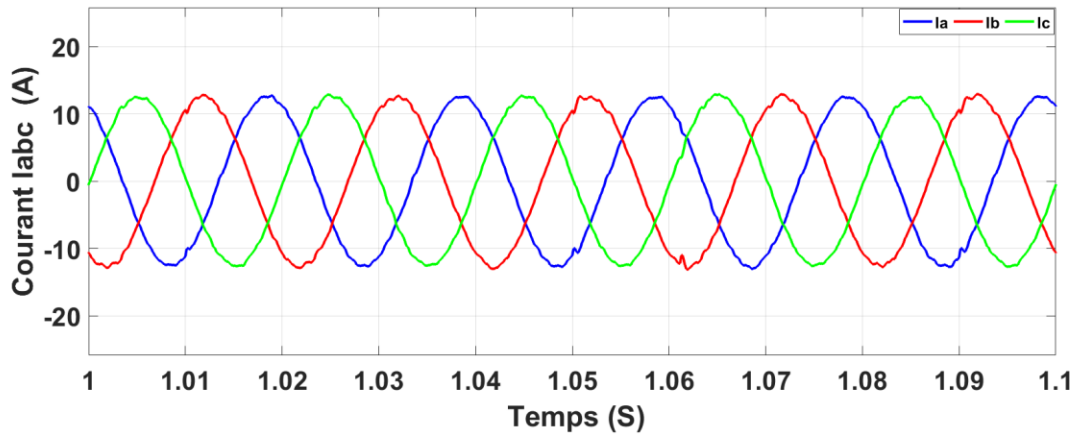


Fig IV.20 Zoom courant de sortie

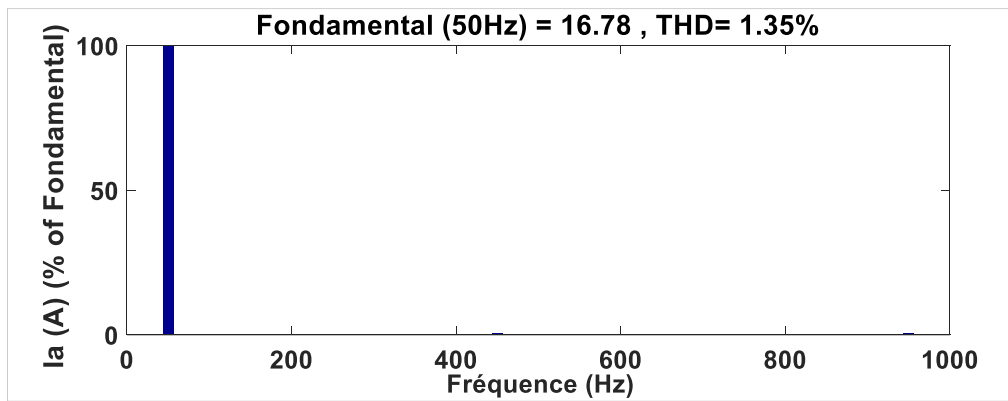


Fig IV.21 Harmoniques du courant sinusoïdal

Le courant de ligne i_a est presque sinusoïdal avec un faible taux de distorsion harmonique THD égal à : $1,35 \% < 5 \%$. Ces simulations démontrent que notre contrôleur PID produit de bons résultats. Il a répondu à la demande de charge malgré les conditions météorologiques changeantes, fournissant une puissance constante tout en respectant les processus de charge et de décharge de la batterie.

IV.4. Conclusion

La combinaison de panneaux solaires photovoltaïques et de générateurs éoliens permet d'exploiter efficacement l'énergie à partir des sources solaires et éoliennes. Cette diversification améliore l'utilisation de l'énergie, réduit la dépendance à l'égard d'une seule source d'énergie et augmente la fiabilité du système dans son ensemble. L'utilisation de contrôleurs PID joue un rôle crucial dans le maintien de la stabilité du système et l'amélioration de ses performances globales. Ces contrôleurs assurent une régulation précise du flux d'énergie, aidant à éviter les fluctuations de tension et de fréquence.

Les résultats des simulations ont permis de conclure sur l'efficacité du convertisseur à fournir le maximum d'énergie que le système photovoltaïque peut générer en fonction de toute variation des conditions météorologiques.

En résumé, l'intégration de contrôleurs PID, de convertisseurs de tension et d'onduleurs triphasés dans un système hybride de production d'énergie solaire/éolienne et de batteries offre une solution complète pour améliorer l'utilisation de l'énergie, renforcer la stabilité du système et atteindre des performances optimales dans divers environnements, quelle que soit leur variabilité. Cette approche contribue à fournir des sources d'énergie durables et fiables, en faisant une option prometteuse pour les applications d'énergie renouvelable.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, ce travail de recherche a exploré les aspects fondamentaux et appliqués des systèmes hybrides à énergie renouvelable, en mettant particulièrement l'accent sur l'optimisation d'un système autonome intégrant des sources d'énergie solaire et éolienne, ainsi qu'une batterie de stockage, à l'aide d'un régulateur PID pour maintenir une tension V_{dc} constante.

Nous avons d'abord présenté un état de l'art des systèmes hybrides à énergie renouvelable. Nous commençons par exposer un bref aperçu sur les systèmes hybrides utilisés actuellement. Les classifications ainsi que les différentes architectures des systèmes multi sources ont aussi été montrées dans cette partie, mettant en évidence les avantages et les défis de ces systèmes, ainsi que les différentes approches utilisées pour les optimiser.

Par la suite nous avons présenté en premier lieu le modèle de la source photovoltaïque, puis nous l'avons exposée à différents rayonnements et températures dans le but d'étudier l'influence de ses paramètres météorologiques sur la puissance fournie par le générateur photovoltaïque de notre chaîne de conversion. En deuxième lieu le hacheur élévateur (Boost) qui constitue le premier étage du système a été modélisé. L'algorithme de maximisation de la puissance (MPPT) classique perturb and observe (P & O) a été implémenté.

La modélisation de la troisième chaîne de conversion composée par une turbine éolienne, une génératrice synchrone à aimant permanent, d'un redresseur triphasé à diodes et d'un convertisseur DC/DC élévateur a été détaillée. Par la suite, dans le but d'extraire la puissance maximale de l'énergie du vent à tout moment, la commande MPPT du système de conversion éolien a été présentée.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de nos simulations, démontrant l'efficacité du régulateur PID pour maintenir une tension V_{dc} link constante dans le système hybride, ainsi que l'impact de différents paramètres sur ses performances globales.

A l'issue de ces travaux, cette mémoire ouvre de nouvelles perspectives de recherche parmi lesquelles nous citons :

- Intégration d'autres sources d'énergies renouvelables.

- Application d'autres méthodes d'optimisations
- Réaliser l'interconnexion au réseau de distribution.
- Concevoir un régulateur intelligent pour la tension du bus.
- Ajoutée une charge de délestage en cas de défiance du système ou surcharge des batteries.



غرداية في : 25 NOV 2024

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة) : بن يحي محمد الصديق

2. الطالب (ة) : بن علا احمد

تخصص : طاقات متجددة في الإلكترونيات

نمنح نحن الأستاذ (ة)

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الاصلية	الصفة	الامضاء
موسى أسامة	MCB جامعة غرداية	مصصح -1-	
حفصي زوليخة	MCB جامعة غرداية	مصصح -2-	
بحري احمد	MCB جامعة غرداية	مؤطر	

الإذن لإيداع مذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Optimisation d'un système autonome (éolienne – photovoltaïque)

إمضاء رئيس القسم

العلمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
والكهر وميكانيك

