REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie **D**épartement de **G**énie **E**lectrique

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergie Renouvelable Électrotechnique

MEMOIRE MASTER

TITRE

Commande d'un Système hybrid (PV/éolien) basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent

Présenté et soutenue par :

-Chergui Maroua **-Bouhla Afef**

Soutenu le 18-06-2023 devant le jury :

-Dr. BOULKHRACHEF SALAH	Université de Médéa	Président du jury
-Dr. MEDJBER AHMED	Université de Médéa	Examinateur
-Pr. MOUALDIA ABDELHAFIDH	Université de Médéa	Encadreur
- Dr. MORSLI ABDELKADER	Université de Médéa	Co-Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

*Tout d'abord, Nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement notre promoteur **MOUALDIA Abdelhafidh**, Professeur à l'Université Yahia Fares, Médéa, pour l'aide qu'il nous a apportée, pour sa patience et sa rigueur scientifique. Ses conseils nous ont été précieux dans l'organisation du travail.*

*Nous remercions également vivement monsieur, notre Co-encadreur **MORSLI Abdelkader**, Professeur à l'université de Yahia farés, Médéa, pour son encadrement, son soutien permanent et pour m'avoir toujours traité.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du **jury** pour l'honneur qu'ils nous fait en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.*

Nous tenons à exprimer notre gratitude à nos parents et amis qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon travail. Et aussi tous les enseignants de Génie électrique de premier cycle

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité´ d'écrire et de réfléchir , et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve, Je dédie ce modeste travail :

Amon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect Mon cher père, Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester la fierté´ et ne jamais te décevoir

Ma mère, honorable, aimable, Tu représentes pour moi le symbole de la bonté´ par excellence, la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé´ de m'encourager et de prier pour moi

Mes frères : Hichem, Zakaria, Abdealali

Mes Sœurs : Soumia, Maroua, Sarah, Romaissa

Les petites : Yasser, Razane, israa, Joulaybib, Abdelhak, Mohamed, Lokman, Belgacem

Mes chères amies : Ahlem, Meriem, Kassira

Ma chère binôme Maroua, qui a partagée avec moi les moments difficiles de ce travail

Toute ma famille : Bouhla

Tous mes amis de promotion

Afef

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité´ d'écrire et de réfléchir , et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve, Je dédie ce modeste travail :

Amon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect Mon cher père, Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester la fierté´ et ne jamais te décevoir

Ma mère, honorable, aimable, Tu représentes pour moi le symbole de la bonté´ par excellence, la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé´ de m'encourager et de prier pour moi

Mes frères : Sofiane, Younes

Mes Sœurs : Safa, Afef, Yousra, Yasmine

Les petites : Maria, Adem, Ishak, Jawad

Mes chères amies : Ahlem, Meriem, Reda

Ma chère binôme afef, qui a partagée avec moi les moments difficiles de ce travail

Toute ma famille

Tous mes amis de promotion

Maroua

Résumé

ملخص

مصادر الطاقة المتجددة هي أنظمة فعالة ونظيفة مقارنة المصادر التقليدية وتستخدم في العديد من التطبيقات، بما في ذلك إنتاج الكهرباء في الأماكن المعزولة وتشغيل ضخ المياه ومناطق كثيرة. ومع ذ لك، ليس هناك ما يضمن أن المصدر متاح دائ مًا (ملف الشمس والرياح والهيدروجين وما إلى ذلك) والحل هو استخدام أنظمة هجينة لضمان استمرارية الطاقة في هذه الأطروحة، درسنا . لتحسين إخراج P&O استخدمنا خوارزمية .إدارة نظام هجين يتكون من مولد كهربائي ضوئي ومولد للرياح وبطارية توفر حمولة ، والتحكم في عزم الدوران في توربينات الرياح ومحولات لضمان معادلة جهد الحافلة. أجريت الدراسة (MPPT) الألواح الشمسية تحت ماتلاب / سيمولينك. إدارة النظام حسب الأحوال الجوية. تطبيق الحمل وتوافر عناصر النظام

كلمات مفتاحية. التور بينات، طاقة الرياح، البطارية، التحكم، إدارة النظام الهجين

Résumé

Les sources d'énergie renouvelables sont des systèmes efficaces et propres comparés aux sources classiques et sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment la production d'électricité dans des endroits isolés, le fonctionnement du pompage de l'eau et de nombreux domaines. Cependant, rien ne garantit que la source est toujours disponible (le soleil, le vent et l'hydrogène, etc.) et la solution consiste à faire appel à des systèmes hybrides pour assurer la continuité de l'énergie.

Dans ce mémoire, nous avons étudié la gestion d'un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque, générateur éolien et d'une batterie alimentant une charge. Nous avons utilisé l'algorithme P&O pour améliorer la sortie du panneau solaire (MPPT), la commande en couple dans l'éolienne et des convertisseurs afin d'assurer l'égalisation de la tension du Bus. L'étude a été réalisée sous Matlab / Simulink. La gestion du système en fonction des conditions météorologiques, demande de la charge et de la disponibilité des éléments du système.

Mots clés : Gestion d'un système hybride, GPV, turbine, Batterie, P&O, MPPT

Abstract

Renewable energy sources are efficient and clean systems compared conventional sources and are used in many applications, including electricity production in isolated places, the operation of water pumping and many areas. However, there is no guarantee that the source is always available (the Sun, wind and hydrogen, etc.) And the solution is to use hybrid systems to ensure power continuity.

In this thesis, we have studied the management of a hybrid system consisting of a photovoltaic generator, wind generator and a battery supplying a load. We used the P&O algorithm to improve the output of the solar panel (MPPT), the torque control in the wind turbine and converters to ensure Bus voltage equalization. The study was carried out under Matlab/Simulink. Management of the system according to weather conditions, application of the load and the availability of the elements of the system.

Key words: Management of a hybrid system, GPV, turbine, Battery, P&O, MPPT.

Nomenclature

Abréviation

ER :	Energie Renouvelable
AC :	Courant Alternatif
CC :	Courant continu.
EDC :	Etat de charge.
FEM :	Force électromotrice.
GSAP :	Génératrice synchrone à aimant permanant.
CIEMAT :	Centre de recherche énergétique environnementale et technologique (Centro de Investigations Energéticas, Mediombientales y Technologicas).
GPV :	Générateur photovoltaïque.
MPPT :	Maximum power point tracking (Recherche du maximum de puissance).
PV :	Photovoltaïque.
P&O :	Perturbation et observation : Commande de perturbation et observation.
SHE :	Système hybride Electrique
STC :	Conditions standards de fonctionnement
GADA :	Génératrice asynchrone double alimentation
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion
MCC :	Machine à courant continu
G :	Rayonnement globale
PI :	Proportionnel intégral.
FF :	Facteur de forme

Nomenclature

Symboles

I_{PH} :	Photo-courant de la cellule [A]
I_s:	Courant de saturation de la diode [A]
V_c:	Tension de la cellule [V]
R_s:	Résistance série [Ω]
R_{sh}:	Résistance shunte [Ω]
q :	La charge de l'électron [q=1.60217646 10^{-19} C]
n	Constante d'idéalité de la diode
k	Constante de Boltzmann [J/K]
I_{s1}:	Courant de saturation de la diode 1 [A]
I_{s2}:	Courant de saturation de la diode 2 [A]
n_1:	Constante d'idéalité de la diode1
G_i:	Irradiation solaire globale du lieu considéré [W/m²]
T_a:	Température ambiante [°C]
P_{in}:	Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque [W]
G_a:	Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque [W/m²]
R_a:	Résistance de l'enroulement d'induit [Ω]
L_a:	l'inductance d'induit [H]
Ω	Vitesse angulaire [rad/s]
J	Moment d'inertie [Kg.m²]
$C_{méc}$:	le couple électromagnétique [N.m]
C_{batt}:	Capacité de stockage de la batterie [Ah]
C_p:	Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine
E_0:	Tension à vide de la batterie [V]
U_a:	Tension d'induite [V]
λ	Rapport entre la vitesse des pales et la vitesse du vent

Nomenclature

$\boldsymbol{I_{pv}}$:	Courant photovoltaïque [A]
$\boldsymbol{I_{red}}$:	Le courant redressé [A]
$\boldsymbol{V_{red}}$:	La tension redressée [V]
$\boldsymbol{P_{batt}}$:	Puissance de la batterie [W]
$\boldsymbol{P_{éol}}$:	Puissance de l'éolienne [W]
$\boldsymbol{P_{pv}}$:	Puissance du Panneau photovoltaïque [W]
$\boldsymbol{I_{batt}}$:	Courant de la batterie [A]
$\boldsymbol{\rho}$ **:**	Masse volumique de l'air [kg/m^3]
β :	Angle de calage (°)
R :	Rayon de la pale [m]
$\boldsymbol{C_{aéro}}$:	Couple aérodynamique de l'éolienne [Nm]
$\Omega_{\boldsymbol{m}}$:	Vitesse mécanique du générateur [tr/min]
$\boldsymbol{V_{dc}}$:	Tension aux bornes du bus continu [V]
m :	masse d'air [g]
$\boldsymbol{V_1}$:	la vitesse en amont de l'aérogénérateur [m/s]
$\boldsymbol{V_2}$:	la vitesse en aval de l'aérogénérateur [m/s]
$\boldsymbol{V_n}$:	la vitesse nominale [m/s]
$\boldsymbol{P_n}$:	la puissance nominale [W]
T :	La température de la cellule [°C]
$\boldsymbol{f}$ **:**	Coefficient de frottement dynamique [N.m/ rd. s^{-1}]
$\boldsymbol{C_r}$:	le couple résistant [Nm]
V :	Vitesses du vent [m/s]
$\boldsymbol{V_{co}}$:	Tension en circuit ouvert [V]
$\boldsymbol{I_{ch}}$:	Courant de la charge [$\boldsymbol{A}$]
E :	L'erreur de l'algorithme FLC

Table des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur le système de production d'énergie hybride

1.1 Classification des systèmes hybrides. . . . 6
1.2 Architecture à bus continu (DC). . . . 6
1.3 Architecture à bus alternatif (AC). . . . 7
1.4 Architecture à bus mixte (AC/CC). . . . 7
1.5 Système hybride étudié (photovoltaïque/éolienne/batteries). . . . 8
1.6 Moulins à vent. . . . 9
1.7 Eolienne de 100 kW de Grand Vent 1957. . . . 10
1.8 Éolienne de Savonius. . . . 11
1.9 Éolienne de Darrieus. . . . 11
1.10 Petites éoliennes à axe horizontal. . . . 12
1.11 Eoliennes lentes 12
1.12 Eoliennes rapides 13
1.13 Les composants de l'aérogénérateur. . . . 15
1.14 Conversion de l'énergie éolienne. . . . 16
1.15 Tube de courant autour d'une éolienne 16
1.16 C_p en fonction de pour différents types d'éoliennes 18
1.17 Caractéristique puissance en fonction de vitesse du vent 19
1.18 Systèmes éoliens basés sur la GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI. . . 21
1.19 la structure du soleil. . . . 24
1.20 Composants du rayonnement solaire 25
1.21 Synoptique d'une cellule solaire 27
1.22 formes des cellules solaires 27
1.23 Cellules monocristallines 28
1.24 Cellules Polycristallines 28
1.25 Cellule Photovoltaïque amorphe 29
1.26 Batterie au Plomb-acide. . . . 30
1.27 Principe de fonctionnement d'une batterie. . . . 31
1.28 Système de supervision 33
1.29 Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie 34
1.30 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol 34

Chapitre II : Modélisation des composants du SEH

2.1 Architecture du système d'énergie hybride étudié. 38

2.2 Chaîne de conversion d'énergie éolienne. . . . 39
2.3 la structure de l'émulateur éolien. . . . 40
2.4 Modèle électrique de la MCC à excitation séparée. . . . 41
2.5 Schéma bloc du régulateur 42
2.6 Schéma représentatif de la MSAP à modéliser 43
2.7 Transformation triphasée- diphasée 44
2.8 Schéma du redresseur à diodes 47
2.9 chaine de conversion d'énergie photovoltaïque 48
2.10 Modèle électrique d'une cellule solaire avec une seule diode et une résistance shunt. . 48
2.11 Modèle électrique d'une cellule solaire avec une à deux diodes et une résistance shunt. 50
2.12 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension 52
2.13 zones de fonctionnement du module photovoltaïque. . . . 52
2.14 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique Courant-tension. . . . 53
2.15 Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements.. . . . 53
2.16 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique Courant-tension. . . . 54
2.17 Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements.. . . . 54
2.18 Schéma de principe d'un convertisseur survolteur. . . . 55
2.19 Modèle R-C de la batterie. . . . 56
2.20 Modèle CIEMAT de la batterie. . . . 57
2.21 Hacheur réversible en courant 58
2.22 Modèle du bus continu 58
2.23 Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux. . . . 59

Chapitre III : Commande et simulation d'un SEH

3.1 Schéma du Systémé global. . . . 62
3.2 Caractéristiques de la puissance en fonction de la vitesse. . . . 63
3.3 Structure de contrôle d'une turbine éolienne 63
3.4 schéma bloc global de la chaine éolienne dans Matlab. . . . 65
3.5 Bloc de simulation de l'émulateur dans Matlab. . . . 66
3.6 Le Profil de vent appliqué. . . . 66
3.7 La vitesse de vent et sa réference. . . . 67
3.8 Le couple électromagnétique de l'émulateur. . . . 67
3.9 Le courant d'armature. . . . 67
3.10 Les courants Iabc de la Gsap. . . . 68
3.11 Les tensions Vabc de la Gsap. . . . 68
3.12 Le courant redressé. . . . 68
3.13 La tension Vdc. . . . 69
3.14 Le courant Idc 69
3.15 La puissance Péol. . . . 69
3.16 Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT. . . . 70
3.17 Principe de la MPPT avec la méthode $P\&O$ 71
3.18 Organigramme de la méthode perturbation et observation ($P\&O$) 71

3.19 Schéma bloc du système photovoltaïque dans l'environnement Matlab 72
3.20 Le courant de GPV. 73
3.21 La tension de GPV 73
3.22 La Puissance de GPV 73
3.23 Le courant de hacheur 74
3.24 La tension de hacheur 74
3.25 La Puissance de hacheur 74
3.26 La tension de GPV et La tension de hacheur 75
3.27 Le rapport cyclique(D) 75
3.28 Le zome rapport de cyclique(D) 76
3.29 Schéma de commande de la tension du bus continu 76
3.30 Structure de contrôle de l'hacheur réversible en courant 79
3.31 Simulation d'un onduleur triphasé commande MLI. 77
3.32 La commande MLI. 77
3.33 La commande MLI. 77

Chapitre IV : Gestion et simulation d'un SEH

4.1 Schéma du système global sous Matlab/Simulink. 80
4.2 L'état de chaque composant constituant le SEH. 81
4.3 Scénarios de fonctionnement d'SEH pendant un jour ensoleillé ou nuageux. 82
4.4 Scénarios de fonctionnement d'SEH pendant un jour ensoleillé ou nuageux. 83
4.5 Scénarios de fonctionnement du système hybride. 83
4.6 Organigramme de gestion qui considère le système de conversion éolien et photovoltaïque. 85
4.7 Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion. 85
4.8 Différents modes d'alimentation de la charge principale. 86
4.9 Système de supervision à base de la logique floue. 90
4.10 Fonctions d'appartenance de delta P0, P1, P2. 87
4.11 Fonctions d'appartenance de delta P3. 87
4.12 Fonctions d'appartenance d'EDC. 88
4.13 Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie. 88
4.14 Evolution des données d'entrée (irradiation, température et vent). 89
4.15 Evolution d'EDC. 89
4.16 Profile de P_{batt}, P_{ch} , P_{pv} et P_{eol} 89
4.17 L'état d'interrupteur photovoltaïque. 89
4.18 L'état d'interrupteur éolien. 89
4.19 L'état d'interrupteur hybride. 89
4.20 L'état d'interrupteur hybride et la batterie. 90
4.21 Puissance supplémentaire (P supliment). 90

Liste des tableaux

1.1 Caractéristiques principales du soleil 25

2.1 Les paramétres de boucle de vitesse et courant. 45

Table des matières

1 Etat de l'art sur le système de production d'énergie hybride **5**

1.1 Introduction : . . . 5
1.2 Généralités sur les systèmes électriques hybrides (SEH) : . . . 5
1.2.1 Définition d'un système hybride . . . 5
1.2.2 Classifications des systèmes d'énergies hybrides : . . . 5
1.2.3 Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH) . . . 6
1.2.4 Système hybride étudié (photovoltaïque/éolienne/batteries) . . . 7
1.2.5 les Avantages etles inconvénients du système hybride étudié :. . . . 8
1.3 Généralité sur les différents composants du système hybride étudié : . . . 9
1.3.1 Généralités sur les systèmes éoliens . . . 9
1.3.2 Généralités sur les systèmes solaire : . . . 22
1.4 Système de stockage : . . . 29
1.4.1 Fonctionnement d'un accumulateur au plomb acide : . . . 30
1.4.2 Caractéristiques des batteries : . . . 30
1.5 les Convertisseurs statiques : . . . 31
1.5.1 Les Redresseurs : . . . 31
1.5.2 Les Hacheurs : . . . 31
1.5.3 Les Onduleurs : . . . 31
1.6 Le système de supervision : . . . 32
1.7 L' état de l'énergie Renouvelable en Algérie : . . . 33
1.7.1 Energie solaire en Algérie : . . . 34
1.7.2 Les gisements éoliens en Algérie : . . . 34
1.8 Conclusion : . . . 35

2 Modélisation des composants du systéme hybride : **38**

2.1 Introduction : . . . 38
2.2 Les outils de modélisastion : . . . 38
2.3 Modélisation de la chaine de production éolienne : . . . 39
2.3.1 Modélisation du vent : . . . 39
2.3.2 Modélisation de la turbine : . . . 39
2.3.3 Modélisation de l'émulateur éolien : . . . 40
2.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents : . . . 42

2.3.5 Modélisation du redresseur à diodes : . . . 46
2.4 Modélisation de la chaine de production photovoltaïque : . . . 47
2.4.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : . . . 48
2.4.2 Paramètres des cellules photovoltaïques : . . . 50
2.4.3 Caractéristiques du module photovoltaïque : . . . 51
2.4.4 L'influence de l'éclairement et de température : . . . 53
2.5 Modélisation de la batterie : . . . 56
2.5.1 Modèle R-C : . . . 56
2.5.2 Le modèle CIEMAT : . . . 56
2.5.3 Modélisation du hacheur réversible en courant : . . . 58
2.6 Modélisation du bus continu : . . . 58
2.7 Modélisation de l'onduleur triphasé : . . . 59
2.8 Conclusion : . . . 60

3 Commande et Simulation d'un Systéme Hybride : 62
3.1 Introduction : . . . 62
3.2 Description des algorithmes MPPT : . . . 62
3.3 Commande de la chaine de conversion éolienne : . . . 63
3.3.1 La commande en couple : . . . 63
3.4 Simulation de la chaine de conversion éolienne : . . . 65
3.5 Les Résultats de Simulation de la chaine de conversion éolienne : . . . 66
3.6 Commande de la chaine de conversion photovoltaïque : . . . 70
3.6.1 Méthode de perturbation et d'observation ($P\&O$) : . . . 70
3.7 Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque : . . . 72
3.8 Les Résultats de Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque : . . . 72
3.9 Le bus continu DC : . . . 75
3.10 Stratégies de commande MLI de l'onduleur : . . . 76
3.11 Conclusion : . . . 78

4 Gestion et simulation du SEH appliquée au charge 80
4.1 Introduction : . . . 80
4.2 Différentes modes de fonctionnement du système hybride : . . . 82
4.2.1 Différents scénarios de fonctionnement du SEH : . . . 83
4.2.2 Système de supervision du SEH : . . . 84
4.2.3 Stratégie de gestion à base de règles floues : . . . 86
4.3 Interprétation des résultats obtenus par la simulation : . . . 88
4.4 Conclusions . . . 90

Introduction générale

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production importante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. En effet, les systèmes éoliens et photovoltaïques ont connu un grand essor ces derniers temps et sont devenus de plus en plus accessibles en terme de technologies et de coûts. Une fois installés, ces systèmes ne dépendent d'aucune source ou réseau et présentent l'avantage de se trouver à proximité des sites de consommation. Cependant nous pouvons nous poser quelques questions. Sont-ils énergétiquement efficaces ? Quel est le temps de retour sur investissement de ces systèmes ? Plusieurs travaux de recherche ont abordés ces questions.

A. Stoppato s'est intéressé à l'évaluation du cycle de vie de la production d'électricité parpanneaux photovoltaïques. Son étude s'est basée sur l'estimation des flux d'énergie au cours des différents processus de production dès l'extraction du silicium jusqu'au montage final des panneaux. On peut citer aussi Carl Johan Rydh Bijörn A. Sandén qui ont étudié les besoins en énergie pour la production d'un système autonome photovoltaïque avec stockage en considérant une variété de technologies de batteries et dans différentes conditions de fonctionnement.

Du côté éolien, on peut évoquer l'étude menée par Brian Fleck Marc Huot et qui emploient une méthode d'évaluation du cycle de vie pour comparer directement les impacts environnementaux, les besoins finaux d'énergie, Il existe aussi dans la littérature quelques travaux synthétiques des impacts environnementaux des systèmes de production à bases de sources renouvelables. A titre d'exemple, on peut mentionner les analyses économique et environnementale faite par Varun et Al. Néanmoins, la majorité des travaux mentionnés s'intéressent aux systèmes de production séparément et dans la plupart des cas concerne le domaine des grandes puissances surtout pour les éoliennes.

Les études sur l'analyse du cycle de vie de systèmes multi sources sont rares pour des maisons autonomes par exemple. C'est la raison pour laquelle nous avons entamé l'étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage pour alimenter une charge . Cette étude comprend la modélisation et la simulation du système complet.

Le travail présenté ici est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les systèmes d'énergie hybride autonome où nous présentons les différentes architec-tures des systèmes électriques multi-sources. Puis nous donnons une étude descriptive des sourcesd'énergie qui composent notre système. Ensuit l'état des sources éoliennes et solaires en Algérie sera présenté.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation qui décrit le comportement des différentes parties de notre système d'énergie hybride autonome. L'ensemble des modèles est représenté sous

l'environ-nement Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre expose les commandes nécessaires dans le système de production hybride autonome. Nous commençons par l'optimisation des sources d'énergie renouvelable l'éolien et photovoltaïque par des contrôleurs MPPT. Ensuite, nous passons à la commande de la tension du bus continu à une valeur constante avec la commande de la batterie, tout en présentant les résultats de simulation.

Le dernier chapitre concerne l'étude de performances du système de supervision pour une gestion de l'énergie du système hybride global appliqué au charge.

Notre travail s'achève par des conclusions générales, des annexes et une section des références bibliographique utilisées

Chapitre 1

Etat de l'art sur le système de production d'énergie hybride

Sommaire

1.1 Introduction : 5
1.2 Généralités sur les systèmes électriques hybrides (SEH) : 5
1.2.1 Définition d'un système hybride 5
1.2.2 Classifications des systèmes d'énergies hybrides : 5
1.2.3 Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH) 6
1.2.3.1 Architecture à bus continu (DC) 6
1.2.3.2 Architecture à bus alternatif (AC) 7
1.2.3.3 Architecture à bus mixte (AC/CC) 7
1.2.4 Système hybride étudié (photovoltaïque/éolienne/batteries) 7
1.2.5 les Avantages etles inconvénients du système hybride étudié : 8
1.3 Généralité sur les différents composants du système hybride étudié : . 9
1.3.1 Généralités sur les systèmes éoliens 9
1.3.1.1 Définition : 9
1.3.1.2 Historique de l'énergie éolienne : 9
1.3.1.3 Modes d'installation : 10
1.3.1.4 Les différentes type d'éolienne : 10
1.3.1.4.1 Selon l'axe : 10
1.3.1.4.2 Selon la vitesse : 13
1.3.1.5 Architecture d'un aérogénérateur : 14
1.3.1.6 Principe de fonctionnement d'un Aérogénérateur : 15
1.3.1.7 Notions Théoriques sur L'aérogénérateur : 16
1.3.1.8 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne : 18
1.3.1.9 Machines électriques dans les Aérogénérateurs : 19

1.3.1.9.1 Machines à courant continu : . . . 19
1.3.1.9.2 Machines asynchrones : . . . 20
1.3.1.9.3 Machines synchrones . . . 20
1.3.1.10 les Avantages et lesinconvénients de l'énergie éolienne : . . . 21
1.3.2 Généralités sur les systèmes solaire : . . . 22
1.3.2.1 Définition d'énergie solaire : . . . 22
1.3.2.2 Caractéristiques du soleil : . . . 22
1.3.2.3 Gisement solaire : . . . 23
1.3.2.4 Caractères particuliers L'énergie solaire : . . . 24
1.3.2.5 Les différents types du rayonnement solaire : . . . 24
1.3.2.6 Historique sur l'énergie solaire photovoltaïque : . . . 25
1.3.2.7 La Cellule solaire photovoltaïque : . . . 26
1.3.2.7.1 Description de la cellule photovoltaïque : . . . 26
1.3.2.7.2 Structure d'une cellule photovoltaïque : . . . 26
1.3.2.7.3 Principe d'une cellule photovoltaïque : . . . 26
1.3.2.8 Les types de cellules photovoltaïques : . . . 27
1.3.2.8.1 La cellule photovoltaïque en silicium mono cristallin : . . . 27
1.3.2.8.2 La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin : . . . 27
1.3.2.8.3 La cellule au silicium Amorphe : . . . 28
1.3.2.9 Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV : . . . 29
1.4 Système de stockage : . . . 29
1.4.1 Fonctionnement d'un accumulateur au plomb acide : . . . 30
1.4.2 Caractéristiques des batteries : . . . 30
1.5 les Convertisseurs statiques : . . . 31
1.5.1 Les Redresseurs : . . . 31
1.5.2 Les Hacheurs : . . . 31
1.5.3 Les Onduleurs : . . . 31
1.6 Le système de supervision : . . . 32
1.7 L' état de l'énergie Renouvelable en Algérie : . . . 33
1.7.1 Energie solaire en Algérie : . . . 34
1.7.2 Les gisements éoliens en Algérie : . . . 34
1.8 Conclusion : . . . 35

1.1 Introduction :

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également parfois désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres », par abus de langage. En effet, si les énergies renouvelables ont bien souvent des avantages écologiques, elles ne sont pas pour autant « vertes » ou « propres » dans le sens où elles ont aussi des conséquences environnementales importantes.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, les énergies (solaire et éolienne) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles .[1]

Dans le présent chapitre nous allons présenter d'une manière générale les systèmes hybrides. Puis, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïque/éolienne avec le système de stockage. Ensuite, nous donnons l'état des sources d'énergie renouvelable en Algérie.

1.2 Généralités sur les systèmes électriques hybrides (SEH) :

1.2.1 Définition d'un système hybride

Un système d'énergies hybride (multi-sources) est un système électrique qui associe au moins deux sources énergétiques reliées au bus par des convertisseurs, permettant de contrôler la tension et le courant fournis par chacune des différentes sources. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage .[2]

Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie . De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenues par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système.[3]

1.2.2 Classifications des systèmes d'énergies hybrides :

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon différentes critères, une Généralisation des classifications les plus répondus sont illustrée sur la Figure (1.1) ci-dessous.

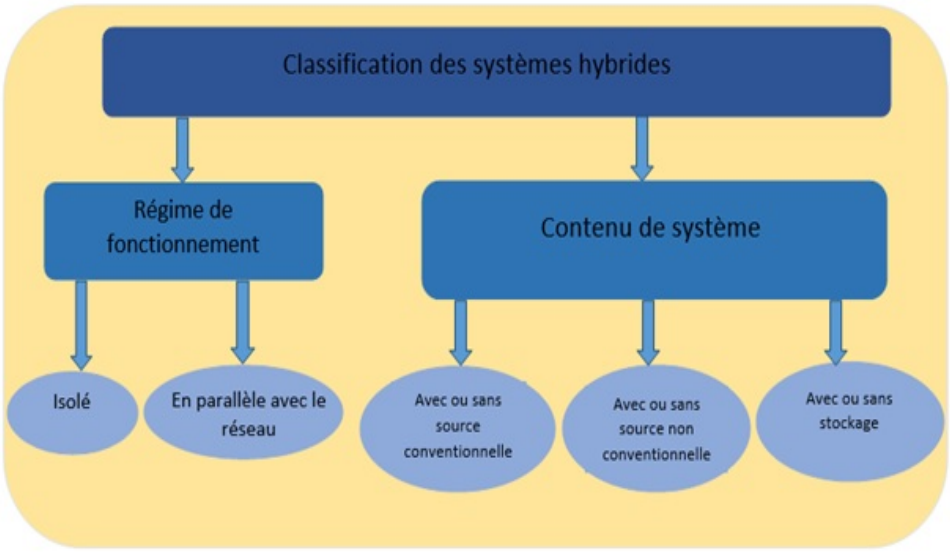


FIGURE 1.1 – Classification des systèmes hybrides.

1.2.3 Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH)

Les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés en trois configurations possibles, architecture à bus continu, architecture à bus alternatif et architecture à bus mixte.[4]

1.2.3.1 Architecture à bus continu (DC)

Dans le système hybride présenté dans la figure (1.2), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à courant continu (DC). Ainsi, le système de conversion d'énergie à courant alternatif (AC) fournit d'abord sa puissance à un redresseur pour être convertie en courant continu (DC).

L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence[4] . La fonction spécifique du système supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs.[5]

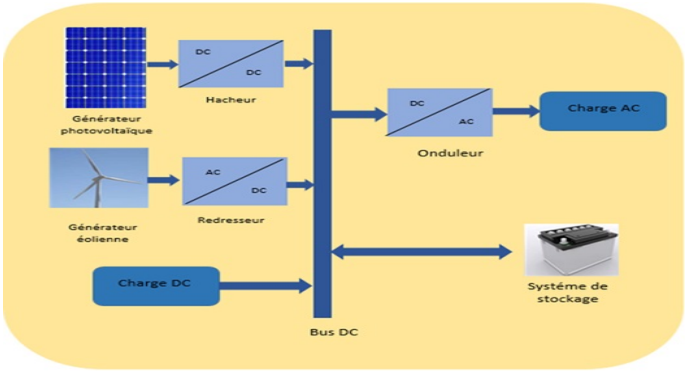


FIGURE 1.2 – Architecture à bus continu (DC).

1.2.3.2 Architecture à bus alternatif (AC)

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative ou au réseau, comme le montre la figure (1.3) ;Cette configuration se distingue par rapport à la configuration antérieure, dans le fait que chaque convertisseur peut être synchronisé avec son géné-rateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autresconvertisseurs[4], ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge.

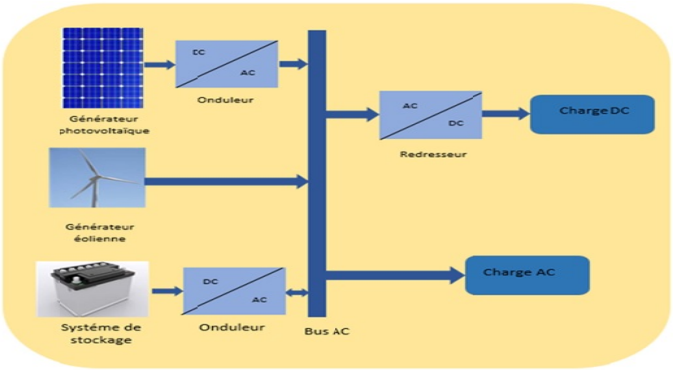


FIGURE 1.3 – Architecture à bus alternatif (AC).

1.2.3.3 Architecture à bus mixte (AC/CC)

Dans la configuration à deux bus, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter Une partie de la charge en AC et l'autre partie en DC. Les deux bus doivent être reliés par un Convertisseur bidirectionnel comme le montre la figure (1.4) :[6]

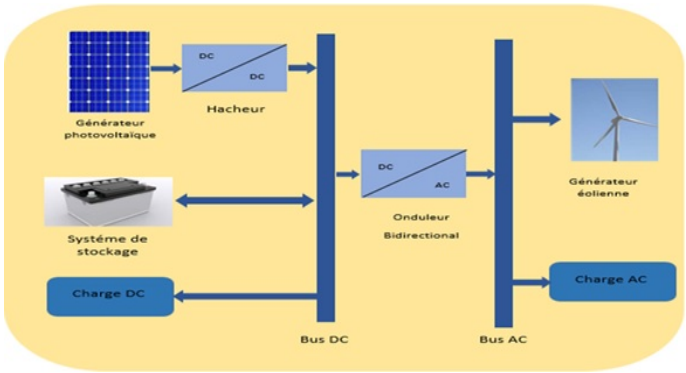


FIGURE 1.4 – Architecture à bus mixte (AC/CC).

1.2.4 Système hybride étudié (photovoltaïque/éolienne/batteries)

Dans notre étude on s'intéresse principalement au système hybride qui combine les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque-éolienne) avec des batteries de stockage.

L'intérêt porté à ce système est dû au fait que l'Algérie dispose d'une position géographique stratégique d'où la disponibilité et la complémentarité des gisements solaire et éolien.[7]

Une stratégie de contrôle avec une bonne gestion d'énergie s'avère être nécessaire, afin d'alimenter une charge sur un site isolé en Algérie et de maximiser le rendement énergétique global.

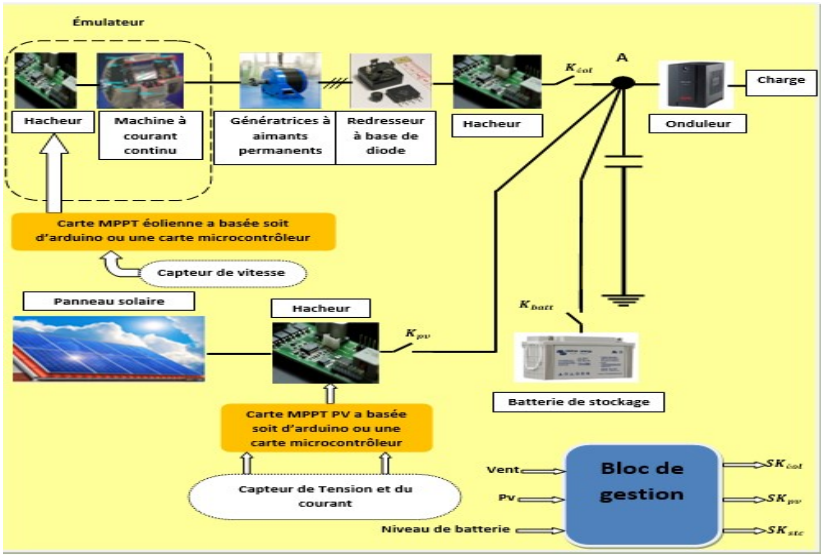


FIGURE 1.5 – Système hybride étudié (photovoltaïque/éolienne/batteries).

1.2.5 les Avantages etles inconvénients du système hybride étudié :

a) Avantages [2]

1. Flexible, extensible et Capable de satisfaire des charges évolutives.
2. Production d'une énergie propre
3. Non dépendant d'une seule source d'énergie.
4. Exploitation simple, travaux de révision réduite

b) Inconvénients [8]

1. Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite souvent le stockage Dans le cas des systèmes autonome.
2. Pas encore entièrement en production commerciale, peu de fournisseurs.
3. Coût de capital élevé.

1.3 Généralité sur les différents composants du système hybride étudié :

1.3.1 Généralités sur les systèmes éoliens

1.3.1.1 Définition :

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance de vent en énergie électrique, donc le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. D'autre part, elles convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique.[9]

1.3.1.2 Historique de l'énergie éolienne :

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C.

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive.[10]



FIGURE 1.6 – Moulins à vent.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs.

Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que le Danemark relance les activités dans les installations d'éoliennes.

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957. L'ingénieur français ANDREAU installa un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents.[10]



FIGURE 1.7 – Eolienne de 100 kW de Grand Vent 1957.

1.3.1.3 Modes d'installation :

Nous trouvons deux modes d'installations des éoliennes :

1. Les éoliennes terrestres dites « on shore » sont installées sur la terre.
2. Les éoliennes marines dites « offshore » sont installées en mer où la présence du vent est plus régulière. [11]

1.3.1.4 Les différentes type d'éolienne :

Les éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé comme suit : [11]

1.3.1.4.1 Selon l'axe : Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

1. **Eoliennes à axe vertical :**[12]

   Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement facilement ainsi les opérations de maintenance, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief, ce qui induit un faible rendement de ce type d'éolienne. De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924).

a)L'éolienne Savonius : Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Fig1.8).[12]

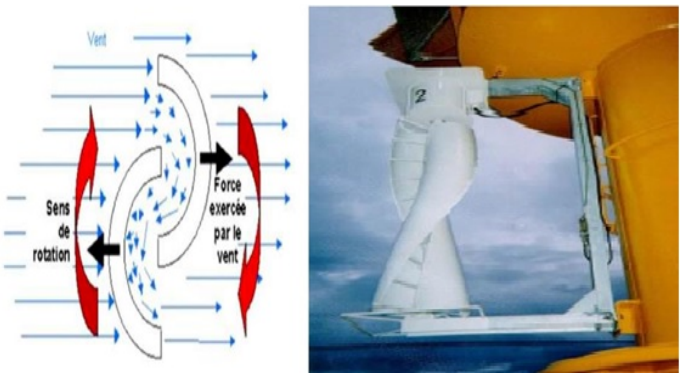


FIGURE 1.8 – Éolienne de Savonius.

b)Les éoliennes Darrieus : Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig1.9). [12]

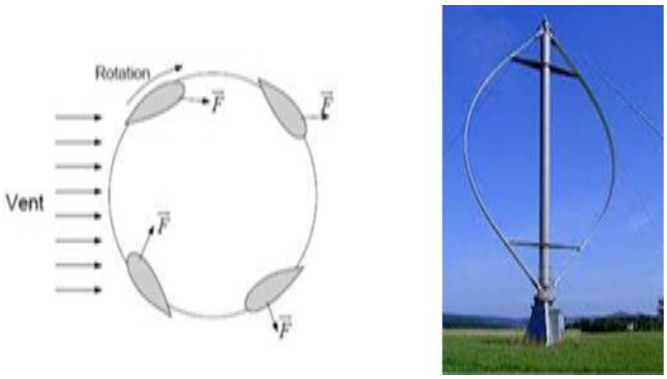


FIGURE 1.9 – Éolienne de Darrieus.

c)Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à axe verticale :
Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants : [12][13]

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretient.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction. Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants :
- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

2. **Éoliennes à axe horizontal :** Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aéro dynamiquement

(Figure1.10). Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal : [19]

1. éolienne lente
2. éolienne rapide.



FIGURE 1.10 – Petites éoliennes à axe horizontal.

a) Éoliennes lentes :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. De nombreuses éoliennes de ce type ont été construites aux Etats Unis dès1870. Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée .Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.[12]



FIGURE 1.11 – Eoliennes lentes

b) Eoliennes rapides :[12]

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des

éoliennes de plusieurs MW. Leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3 m/sec. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques et ont un rendement énergétique un peu plus faible. Elles sont visuellement moins esthétiques. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants optent pour des Aérogénérateur tripales.



FIGURE 1.12 – Eoliennes rapides

C) Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes Horizontales ont une très bonne réputation dans le domaine de la production d'énergie renouvelable, grâce à leurs avantages :

1. Elle est fiable
2. Elle offre un très bon rendement
3. Elle est silencieuse, abordable, écologique
4. Elle est adaptée aux zones les plus venteuses

Toutefois, l'éolienne horizontale n'est pas parfaite et certains inconvénients ternissent leur réputation, notamment les suivantes :

1. Elle met plus de temps pour se mettre en route que l'éolienne verticale
2. Elle est très fragile
3. Elle peut été très chère
4. Son efficacité dépend des condition

1.3.1.4.2 Selon la vitesse :[14]

1. **Éoliennes à vitesse fixe :**

   Les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change.

⇒ les avantages et inconvénient des Éoliennes à vitesse fixe :

a) Les avantages :

-Simple, robuste, fiable.

-Faible coût déconstruction et maintenance

b)Les inconvénients :

-Rendement de conversion faible

-Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci

-Fluctuation importante de la puissance

2. **Éoliennes à vitesse variable :**

   Les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ, qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking . Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable,l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance.

   ⇒ les avantages et inconvénient des Éoliennes à vitesse variable :

   a) Les avantages :

   -Fort rendement de conversion d'énergie.

   -Puissance électrique de meilleure qualité.

   -Stress mécanique réduit.

   b)Les inconvénients :

   -Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs.

   -Contrôle du système plus compliqué.

1.3.1.5 Architecture d'un aérogénérateur :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateur qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de ces éléments :[14][15]

a) Les pales :[15] Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

b) Le moyeu :[15] C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

c) Le rotor :[11] le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Le rendement maximal du rotor est d'environ 59

d) Le mat ou la tour :[11] c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier de l'énergie cinétique maximal du vent et pour éviter les perturbations

e) La nacelle : [11] La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Les éléments regroupés sont :

-Multiplicateur : il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.

-Le système de refroidissement : il se compose généralement d'un ventilateur électrique utiliséPour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

-La génératrice électrique : elle est l'élément principal de la conversion mécano-électrique.

-L'arbre lent : il relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

-L'anémomètre et La girouette : l'anémomètre mesure la vitesse du vent et la girouette indique la direction du vent.

-Le système d'orientation : il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le Même sens.

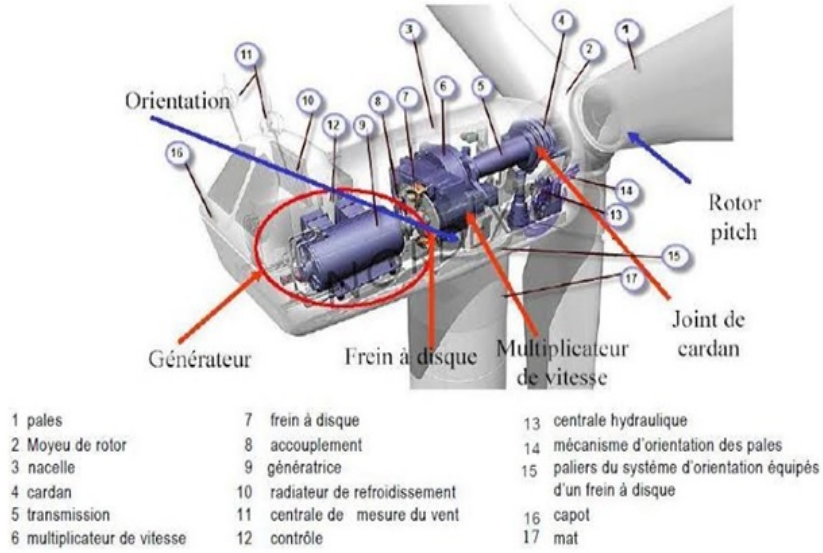


FIGURE 1.13 – Les composants de l'aérogénérateur.

1.3.1.6 Principe de fonctionnement d'un Aérogénérateur:

Le principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie cinétique du vent en Énergie mécanique et ensuite en énergie électrique peut être décrit dans ces 03 étapes Suivantes :

1) Au niveau des pales (capteur d'énergie), qui extraient une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique.

2) Au niveau de la génératrice électrique synchrone ou asynchrone, qui reçoit l'énergie mécanique pour la convertir en énergie électrique, transmise ensuite au convertisseur statique.

3) Au niveau de convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur Électrique et la charge, cette dernière diffère selon les besoins de l'utilisation.[16]

La figure suivante (1.14) illustre le principe de conversion de l'énergie éolienne.

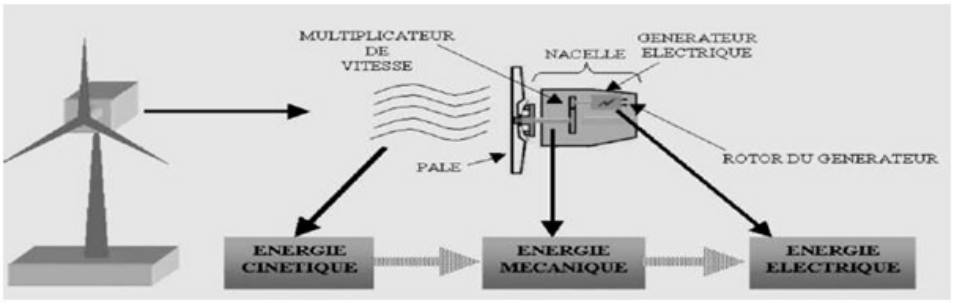


FIGURE 1.14 – Conversion de l'énergie éolienne.

1.3.1.7 Notions Théoriques sur L'aérogénérateur :

a)Limite de Betz : La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés, considérons le système éolien à axe horizontal (Figure 1.15) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. [17]

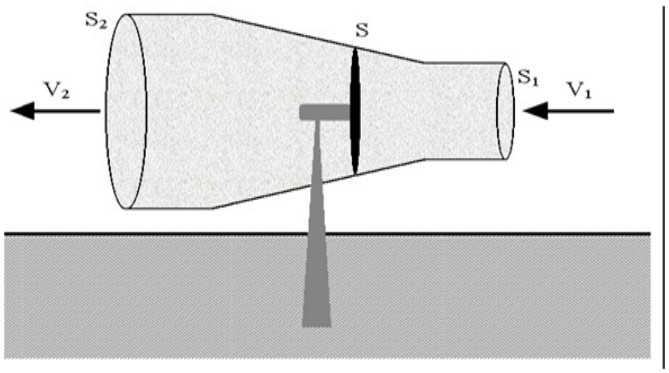


FIGURE 1.15 – Tube de courant autour d'une éolienne

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant En supposant que la vitesse (V) du vent traversant le rotor est égale à la moyenne des deux vitesses (V_1 et) donc :

$$\boxed{V = \frac{V_1 + V_2}{2}} \tag{1.1}$$

L'énergie éolienne provienne de l'énergie cinétique du vent. Si on considéré une masse d'air m(Kg) qui se déplace avec la vitesse $V(m/s)$, l'énergie cinétique de cette masse est :

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2}V^2 m} \tag{1.2}$$

La masse d'air en mouvement de densité traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$\boxed{m = \rho S \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)} \tag{1.3}$$

La puissance mécanique P_m extraite de l'éolienne s'exprime comme suite :

$$\boxed{P_m = \frac{1}{2} m \left(V_1^2 - V_2^2 \right)} \tag{1.4}$$

En remplaçant «m» par son expression dans l'équation, on aura :

$$\boxed{P_m = \frac{1}{4} \rho S \left(V_1 + V_2 \right) \left(V_1^2 - V_2^2 \right)} \tag{1.5}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1, la puissance P_{mt}correspondante serait alors :

$$\boxed{P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S \left(V_1^3 \right)} \tag{1.6}$$

Le ratio entre la puissance extra traité du vent et la puissance totale théoriquement disponible est appelé coefficient de puissance(Cp), il s'exprime comme suit :

$$\boxed{C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2} \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right)}{2}} \tag{1.7}$$

On constate que le coefficient de puissance (Cp) ne dépasse pas la valeur maximale de 0.59, cette valeur théorique est appelée la limite de Betz .

En réalité, cette limite n'est jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre Coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport Entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

b)Puissance récupérable par une éolienne : La Puissance du vent est la Puissance récupérable qui traverse une certaine surface ($S = \pi R^2$ Où R=rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse instantanée du vent V [m/s] :[11]

$$\boxed{P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} \tag{1.8}$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, on introduit alors le coefficient de puissance Cp dans le calcul de la puissance aérodynamique. La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\boxed{P_{turbine} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 V^3} \tag{1.9}$$

Où : $\rho = 1,235 kg/m^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer.

On peut définir le coefficient Cp comme le rapport (le ratio)

c)Couple Produit par L'éolienne :

$$\boxed{C = \frac{P_{turbine}}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2}\rho C_p \pi R^2 V^3}{\Omega}} \tag{1.10}$$

d)Vitesse Spécifique de L'éolienne : Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio),comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent :

$$\boxed{\lambda = \frac{R\Omega}{V}} \tag{1.11}$$

Sur le graphique ci-dessous, on remarque dans un premier temps que les éoliennes tripales ont un meilleur rendement aérodynamique. De plus, leur coefficient de puissance décroît lentement lorsque la vitesse augmente. [11]

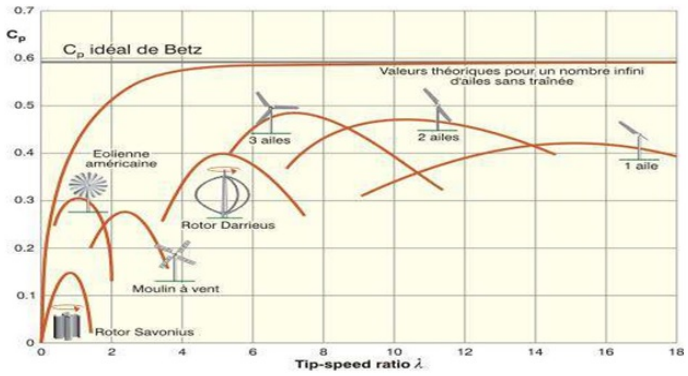


FIGURE 1.16 – C_p en fonction de pour différents types d'éoliennes

1.3.1.8 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n Pour des vitesses de vents supérieures à V_n, la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas P_n pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnâtes : v_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et v_M la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement (Figure 1.17)[3]

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

⇒La zone I : où $P_t = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance).

⇒La zone II : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V.

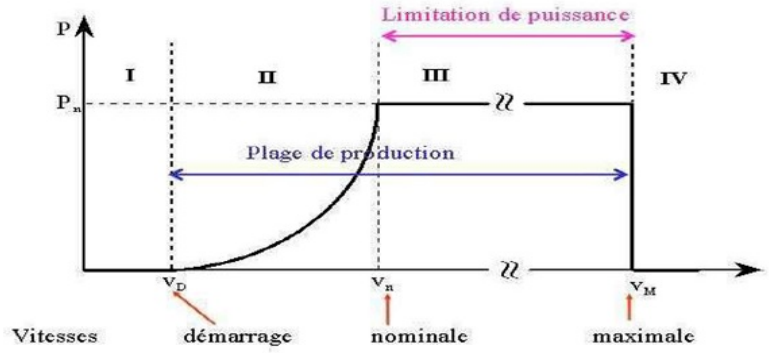


FIGURE 1.17 – Caractéristique puissance en fonction de vitesse du vent

⇒La zone III : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P turbine fournie reste sensiblement égale à P_n.

⇒La zone IV : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

⇒système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesse.

⇒Système « stall » ou « à décrochage aérodynamique » : pour éviter l'emballement du rotor par des vents forts, les pales sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique.Ainsi le rotor ne monte plus en vitesse lorsque le vent augment à cause des turbulences qui circule autour de la pale et fait diminuer sa portance, réduisant ainsi le couple produit. Ce type de régulation est le plus utilisé car ne nécessite pas de pièces mobiles, ni de système de régulation dans le rotor. Les pales sont fixées par rapport au moyen de l'éolienne

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

⇒ basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal.

⇒pas variable par la pression du vent (modèle Air wind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage).

1.3.1.9 Machines électriques dans les Aérogénérateurs :

Les deux types de machines les plus utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes, on citera quelque unes d'entre elle et on s'intéressera d'avantage à la Génératrice synchrone à aimant permanent.

1.3.1.9.1 Machines à courant continu : Les machines à courant continu sont utilisées sur les éoliennes de faible puissance et on peut l'utilisé avec un émulateur de vent. Ce type de machine comporte un stator portant le circuit inducteur (bobine ou à aimants permanents), et un rotor constituant le circuit induit connecte aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs.

1.3.1.9.2 Machines asynchrones :

A. Génératrice Asynchrone à cage d'écureuil

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil sont destinées à un fonctionnement en moteur. Mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse, de simplicité mécanique et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. Généralement utilisés pour les éoliennes de grande puissance. [22]

B. Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un a tout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant .[19]

1.3.1.9.3 Machines synchrones

A. Générateur synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique.

Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau.

Les machines synchrones à rotor bobiné présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse et demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor.

Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Les sites isolés ne sont pas donc adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. [20]

B. Générateur synchrone à aimant permanent :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs.

Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles, permettent de développer des couples mécaniques considérables et nécessitent pas une source d'alimentation pour le circuit d'excitation.

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes(champs axial), ou encore à rotor extérieur [21].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viableéconomiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation.

Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Ce quiest très intéressent dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles(offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin unerégulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [15].

Dans la configuration de la GSAP de la Fig. (1.18), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au charge est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance [22]

L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW)

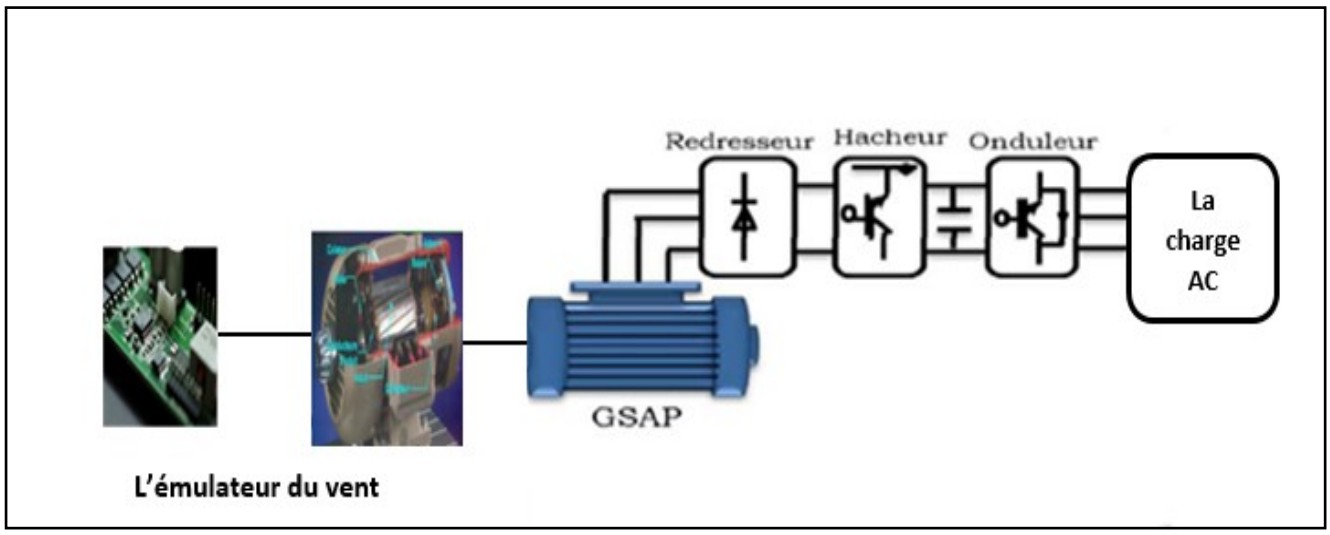


FIGURE 1.18 – Systèmes éoliens basés sur la GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI.

1.3.1.10 les Avantages et lesinconvénients de l'énergie éolienne :

a)les Avantages [23]

1. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant et propre.
2. La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
3. La surface occupée au sol est peu importante. Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

4. La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.

b)les Inconvénients [24]

1. L'énergie éolienne est dépendante de la topographie et de la nature stochastique du vent.
2. Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
3. Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région et l'impact sur les parcours migratoires des oiseaux.
4. Les éoliennes produisent deux types de nuisances sonores. La première est due au sifflement produit lors du passage de l'air dans les hélices, et la deuxième au grincement engendré par la rotation des différents éléments mécaniques.

1.3.2 Généralités sur les systèmes solaire :

1.3.2.1 Définition d'énergie solaire :

L'énergie solaire occupe une place très importante parmi les différentes sources d'énergies renouvelables , L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables. Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable.et malheureusement on ne peut pas l'exploiter directement car il faut la transformer en d'autres formes d'énergies plus utiles [30] :

⇒en bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive)

⇒en utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique)

⇒en transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques (énergie photovoltaïque).

1.3.2.2 Caractéristiques du soleil[31] :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. Le soleil a une importance primordiale car il est a l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie. Le soleil est une étoile pseudo-sphérique qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% tous les éléments chimiques connus, il représente 99.9% de la masse du système solaire Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau(1.1) :

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitue de :

1. **Le noyau :** contient 40% de la masse du soleil, l'épaisseur de 25.104 km, c'est la ou se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, elle présente les caractéristiques suivantes :
   ⇒ Une température de $15.106^{\circ}C$
   ⇒Une densité est de 1015 kg/m3.

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$10x10^{30}$
Surface (km^2)	$6.09.10^{12}$
Volume (km^3)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m^3)	1408
Vitesse (km/s)	217

TABLE 1.1 – Caractéristiques principales du soleil

⇒Une pression de 109 ATM (atmosphère moyenne).

2. **La zone radiative :** elle présente les propriétés suivantes
   ⇒Une épaisseur de 244160 km.
   ⇒ Une température variant de $10.106°C$ à $50.104°C$.
3. **La zone de convection :** elle présente les propriétés suivantes :
   a) La photosphère : est une couche opaque, Elle présente les caractéristiques suivantes :
   ⇒La température de surface décroit de $6400°C$ à $4500°C$.
   ⇒Une épaisseur de 500 km.
   ⇒Une pression de 1/100 ATM.
   b) La chromosphère : cette couche présente les caractéristiques suivantes :
   ⇒Une épaisseur 2000 km.
   ⇒ Une température augmentant de $4200°C$ à $104°C$.
   c) La couronne :est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont :
   ⇒ Elle est sans limite précise.
   ⇒ La température augmente de $106°C$ à $2.106°C$

1.3.2.3 Gisement solaire [31] :

L'énergie solaire peut trouver leur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, qui sont :

⇒Le rayonnement solaire qui fournit 99.97%de sa densité thermique.

⇒La chaleur interne terrestre qui fournit 0.03% de sa densité thermique

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est a L'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme. Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photo thermique, et c'est sur ce principe que sont basés les procédés de

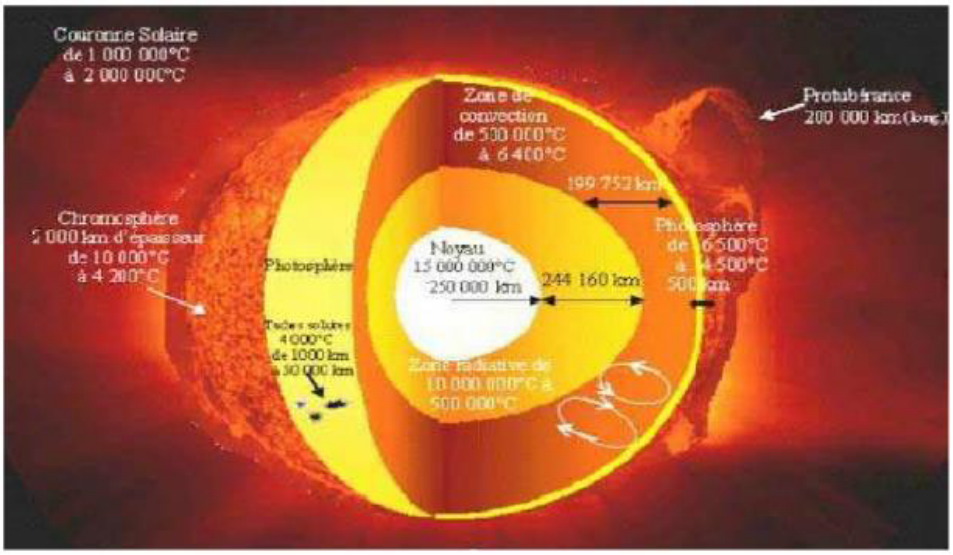


FIGURE 1.19 – la structure du soleil.

capteur plan solaire L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

⇒ Capteur solaire photo thermique

⇒ Capteur solaire photovoltaïque .

1.3.2.4 Caractères particuliers L'énergie solaire :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés Suivantes :

1. Elle est propre, sa densité de puissance maximale est de $1kW/m^2$ à midi par ciel bleu sur toute la planète.

2. La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol ($1kW/m^2$). Elle est intermittente et variable a cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.

3. L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est du 1000 aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante. [31]

1.3.2.5 Les différents types du rayonnement solaire:

a) Le rayonnement solaire direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donne en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair. [31]

b) Le rayonnement solaire diffus :

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère ; pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées . Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste. [31]

c) Le rayonnement solaire réfléchi :

C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante Dépend de la nature du sol et de sa couleur. [31]

d) Le rayonnement solaire global :

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct est La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global. Le rayonnement solaire global est composé de rayonnement de différentes longueurs d'onde et intensités. [31]

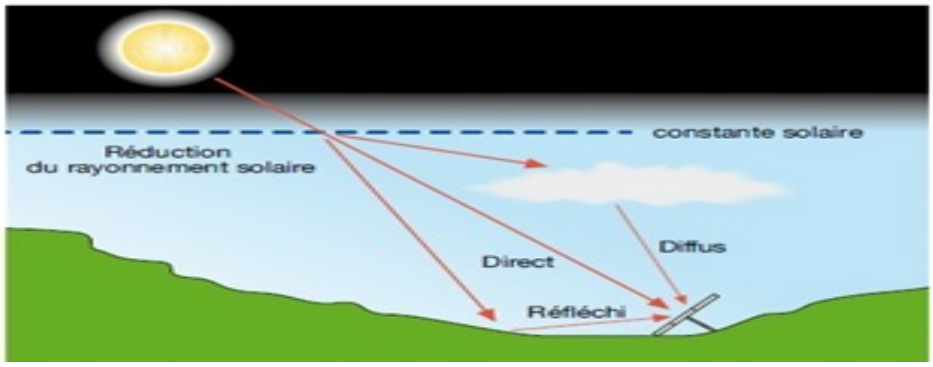


FIGURE 1.20 – Composants du rayonnement solaire .

1.3.2.6 Historique sur l'énergie solaire photovoltaïque :

En 1838, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît dans l'histoire de l'énergie solaire. Le français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque pour la première fois. Bequerel expérimentait une batterie électrolytique avec des électrodes de platine et réalisait que, lorsqu'il était exposé au soleil, le courant augmentait. C'était le début de l'énergiesolaire photovoltaïque. L'étape suivante a été franchie en 1873 lorsque l'ingénieur électricien anglais Willoughby Smith a découvert l'effet photovoltaïque dans les solides. Dans ce cas à propos de sélénium.
Quelques années plus tard, en 1877, l'Anglais William Grylls Adams, professeur de philosophie naturelle au King's College de Londres et son élève Richard Evans Day, ont découvert qu'ils

exposaient le sélénium à la lumière pour produire de l'électricité. Ils ont ainsi créé la première cellule photovoltaïque au sélénium.

En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson et Daryl Chaplin ont découvert la cellule solaire en silicium. Cette cellule produisait suffisamment d'électricité et était suffisamment efficace pour faire fonctionner de petits appareils électriques. Ces cellules photovoltaïques avaient une grande importance dans l'avenir de l'histoire de l'énergie solaire.

Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce ne sont apparues qu'en1956, même si le coût était encore très élevé pour la plupart des gens jusqu'en 1970 environ, lorsque le prix des cellules solaires a chuté d'environ 80%. Les cellules solaires ont été utilisées dans les satellites américains et soviétiques lancés depuis la fin des années 1950[30].

1.3.2.7 La Cellule solaire photovoltaïque :

1.3.2.7.1 Description de la cellule photovoltaïque : Une cellule photovoltaïque est l'élément fondamental de la conversion photovoltaïque. En effet, cette cellule qui est exposée à la lumière (photons), transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Latension obtenue est fonction de la lumière incidente. La photopile délivre une tension variable entre 0V et 0.7V [33], elle dépend des propriétés des matériaux utilisés et de la température.

1.3.2.7.2 Structure d'une cellule photovoltaïque : La cellule solaire est réalisée en suivant les étapes suivantes :

1)La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopée N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.

2) La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur.Les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P), comme illustré sur la figure suivante :

1.3.2.7.3 Principe d'une cellule photovoltaïque [31] : Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +). La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.

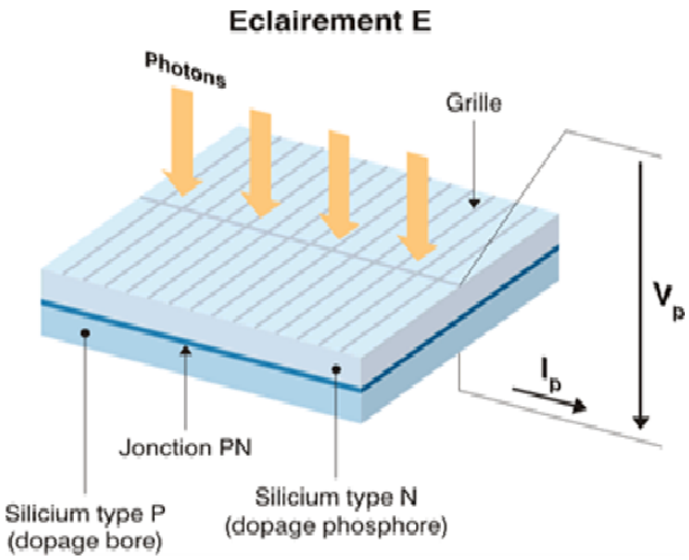


FIGURE 1.21 – Synoptique d'une cellule solaire

1.3.2.8 Les types de cellules photovoltaïques :

Les photopiles au silicium cristallin sont plus répandues [34]. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées . Si l'on parle de matériaux cristallin, c'est parce que le silicium a les propriétés d'un cristal, avec un arrangement parfait des atomes.

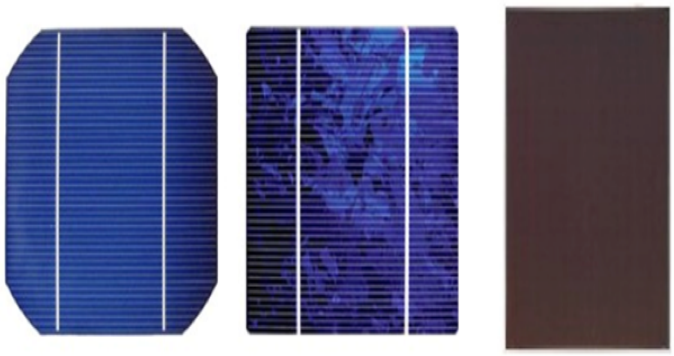


FIGURE 1.22 – formes des cellules solaires

1.3.2.8.1 La cellule photovoltaïque en silicium mono cristallin : Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium mono cristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.Le silicium mono cristallin est le résultat du refroidissement du silicium fondu. Une fois solidifié, il se transforme en un cristal uniforme qui est découpé en tranches fines afin de former la cellule photovoltaïque. La couleur de ce matériau est bleue, sans trace de cristaux ou autres [35].

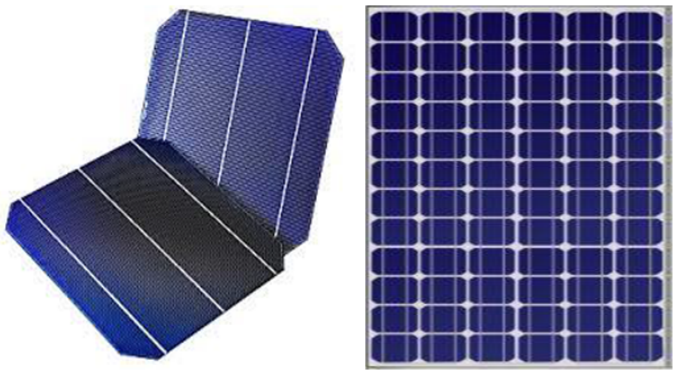


FIGURE 1.23 – Cellules monocristallines

1.3.2.8.2 La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin : Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles. Pour obtenir du silicium Polycristallin, on fait fondre le silicium dans un moule métallique carré et allongé, appelé lingotière. Le coloris de ce type de cellule est bleu et parsemé de motifs laissés par les cristaux. Cette particularité nous permet de reconnaître facilement cette cellule photovoltaïque [35].

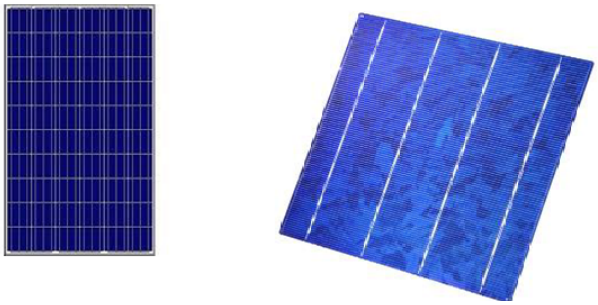


FIGURE 1.24 – Cellules Polycristallines

1.3.2.8.3 La cellule au silicium Amorphe : La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les mono cristallines ou les Polycristallin.

On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Le silicium amorphe est obtenu à partir de gaz de silicium. Ce gaz est vaporisé sur un support, en verre, en plastique souple ou en métal, grâce à un procédé de projection sous vide. Ces cellules photovoltaïques sont gris foncé.

Cette cellule solaire est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide,Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux.

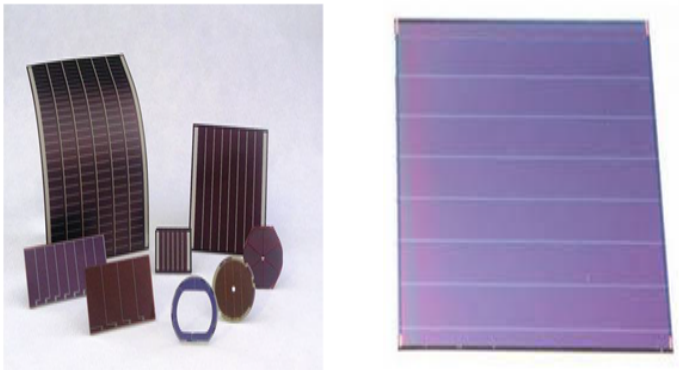


FIGURE 1.25 – Cellule Photovoltaïque amorphe

1.3.2.9 Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV :

a) les Avantages : 1. Une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

2. Leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet (extensible).

3. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. Il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.

4. Ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.

b) les Inconvénients : 1. La fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

2. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10 à 15%, avec une limite théorique pour une cellule de 23%.

3. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

4. La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.

1.4 Système de stockage :

Le stockage d'énergie est un facteur clé dans un système d'énergie hybride en site isolé, étant donné le caractère aléatoire et variable dans le temps des énergies renouvelables. De nos jours, les technologies les plus émergentes dans les SEH sont les technologies électrochimiques et principalement les systèmes de stockage d'énergie à batterie[7]. Les accumulateurs électrochimiques(Batteries) sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker de l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation.

Contrairement aux photopiles, où il n'y a qu'un transport d'électron ne donnant lieu à aucune « usure », dans les accumulateurs électrochimiques, il y a transfert de matière de l'électrolyte vers les électrodes et par conséquent une « usure » incontournable qui limite leur durée de vie. Les batteries construit par l'acide et du plomb sont les plus répandues car elles offrent le meilleur compromis en termes de coût / performance / entretien pour un système multi-sources, Cependant, ce genre de batteries est sensible aux décharges trop profondes conduisant à une diminution importante de leur durée de vie [36].



FIGURE 1.26 – Batterie au Plomb-acide.

1.4.1 Fonctionnement d'un accumulateur au plomb acide :

La batterie plomb acide est un système électrochimique capable de restituer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte (voir figure 1.26).L'électrode positive est en dioxyde de plomb (PbO_2) et la négative en plomb. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. La différence de potentiel entre les deux électrodes est de 2V [1]. (PbO_2) est l'électrode positive pôle (+), Pb l'électrode négative pôle (-) tant qu'en charge ou en décharge, son électrolyte est de l'acide sulfurique (H_2SO_4).

⇒ Processus de décharge : Lors de la décharge, le plomb de l'anode s'oxyde en perdant deux électrons tandis que celui de la cathode en gagne deux lors de sa réduction. L'hydrogène apparu à l'anode et l'oxygène produit à la cathode se recombinent en eau (H_2O).

⇒ Processus de charge : Lors de la charge ce sont les réactions inverses des précédentes qui apparaissent car celles-ci sont réversibles. L'eau est alors décomposée à chaque électrode, c'est-à dire que l'oxygène réagit au pôle positif avec le plomb tandis que l'hydrogène réagit avec l'acide au pôle négatif [20].

1.4.2 Caractéristiques des batteries :

Les paramètres techniques les plus représentatifs identifiés d'un accumulateur sont les suivants [7] :

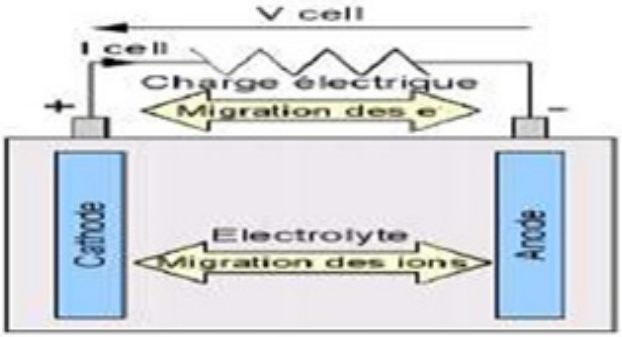


FIGURE 1.27 – Principe de fonctionnement d'une batterie.

⇒ Capacité : a capacité est une quantité d'électricité, exprimée en Ah, pour un régime donné. Elle correspond au total des Ah disponibles lorsque la batterie est déchargée à un certain régime (ou à un certain courant) à partir de 100IJ d'état de charge jusqu'à la tension limite de fin de décharge. Généralement, la capacité est calculée en multipliant le courant de décharge par letemps de décharge. Elle dépend de la température ainsi que du régime et elle est maximale quand la batterie est neuve. Les fabricants de batteries fournissent souvent la capacité nominale qui est obtenue à un courant de décharge nominal, respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température données [37]..

⇒ Tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

⇒ Durée de vie et cycle de vie : les deux caractéristiques définissent la durabilité d'un système de stockage. La durée de vie est mesurée en années. D'autre part, la durée de vie du cycle est mesurée dans les cycles de charge-décharge.

⇒ Profondeur de décharge : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge.

⇒ Autodécharge : définit l'énergie perdue par un système de stockage pendant le temps de non-utilisation. Ce paramètre est mesuré par la relation entre l'énergie perdue pendant une certaine période de temps (heure, jour où mois) et la capacité énergétique du dispositif de stockage.

⇒ Rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

⇒ Etat de charge (EDC) : c'est la quantité d'énergie disponible divisée par la capacité nominale de la batterie. Si $EDC = 1$, la batterie est chargée et quand : $EDC = 0$, la batterie est vide.

1.5 les Convertisseurs statiques [38] :

L'électronique de puissance est une branche de l'électronique et de l'électrotechnique à pour objet de modifier la présentation de l'énergie électrique à l'aide d'un convertisseur statique. Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du

signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge .L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance.[1]

On distingue les différents convertisseurs suivants :

1.5.1 Les Redresseurs :

c'est un convertisseur alternatif-continu .La tension de sortie est non alternative à valeur moyenne non nulle ; cette valeur moyenne peut être réglée dans le cas d'un redresseur .ils sont utilisés principalement pour alimenter des charges fonctionnant avec une tension continu ou pour recharger des batteries (en effet, un redresseur est toujours intégré dans les chargeurs de vos pc ou les téléphones portables).

1.5.2 Les Hacheurs :

c'est un convertisseur alternatif-continu, qui donné en sortie une tension alternative de même fréquences que la tension d'entrée et dont on peut réduire la valeur efficace de façon continu. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour la varier la vitesse des moteurs alternatifs comme les moteurs asynchrones ou synchrones en variant leur tension d'alimentation.

1.5.3 Les Onduleurs :

l'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, utilisé principalement pour alimenter les charges fonctionnant avec une tension alternative lorsqu'on dispose d'une source continu (batteries par exemple) ou pour injecter l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dans le réseau. On distingue 2types :

- Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur .il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner ; par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare

- Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui en commutation naturelle assisté par le réseau, auquel il raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par réoccupation de l'énergie lors des périodes de freinage dans les motrices électriques)

1.6 Le système de supervision :

Un système de supervision est une entité dotée d'une intelligence lui permettant de gérer d'une manière efficace les interactions entre les différents éléments d'un système hybride. Il représente le cerveau du système hybride, il décide de l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries) en fonction de la demande de la charge et en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables [39]. Plusieurs stratégies de gestion et de supervision sont proposées dans la littérature pour traiter les différentes problématiques propres aux différents systèmes multi-sources.

Ce qui prend un modèle plus proche du système réel. Les travaux ont été faits pour une modélisation et analyse d'une stabilité d'un système hybride. Les aspects théoriques ont été utilisés à base des méthodes intelligentes de logique flou afin de bien vouloir maitriser le modèle de supervision et faire l'appliquer pour résoudre les problèmes de stabilité[36][7].



FIGURE 1.28 – Système de supervision

1.7 L' état de l'énergie Renouvelable en Algérie :

Ces dernières années, la demande mondiale en énergie a atteint un seuil préoccupant pour un grand nombre de pays. L'Algérie comme tout autre pays a tracé sa feuille de route pour l'usage et la promotion des énergies renouvelables. Motivé par son engagement envers lacommunauté internationale pour la lutte contre le réchauffement climatique et sa possession de l'un des plus grands gisements solaires au monde [40].

L'état algérien est lancer un programme «TAFOUK 1» d'une capacité de 15.000MW à l'horizon 2035, dont 4000 MW d'ici 2024, sera mis en oeuvre et plus de 630 MW seront réalisés a la fin de 2020 (423MW d'énergie photovoltaïque et 10MW d'énergie éolienne) [41].La réalisation de ces capacités permettra d'économiser près de 240 milliards de m_3 de gaz naturel et d'éviter ainsi l'émission de 200 millions de tonnes de CO_2 [42].

1.7.1 Energie solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 3200 heures d'ensoleillement par an, On peut compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. Bien que les conditions géographiques, climatiques et météorologiques soient très favorables, l'énergie solaire en Algérie n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge Figure(1.29).

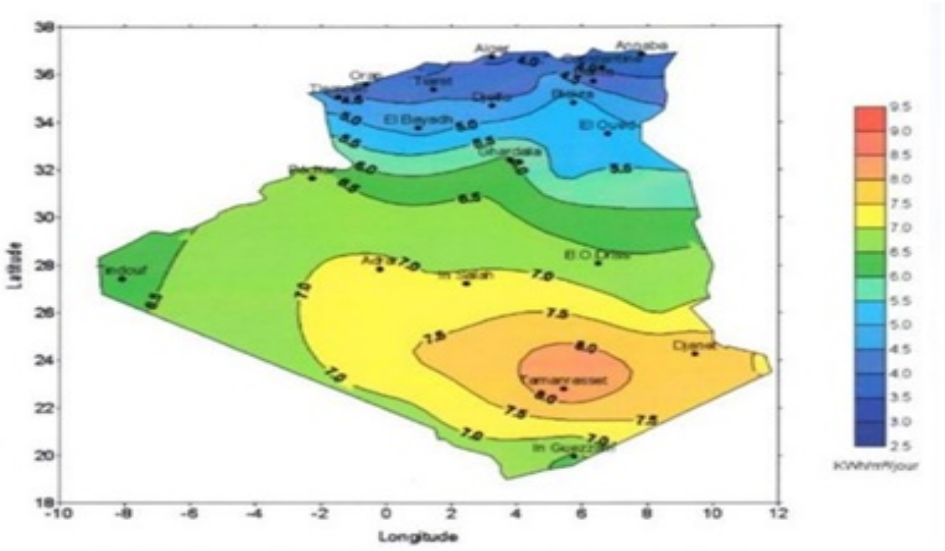


FIGURE 1.29 – Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie

1.7.2 Les gisements éoliens en Algérie :

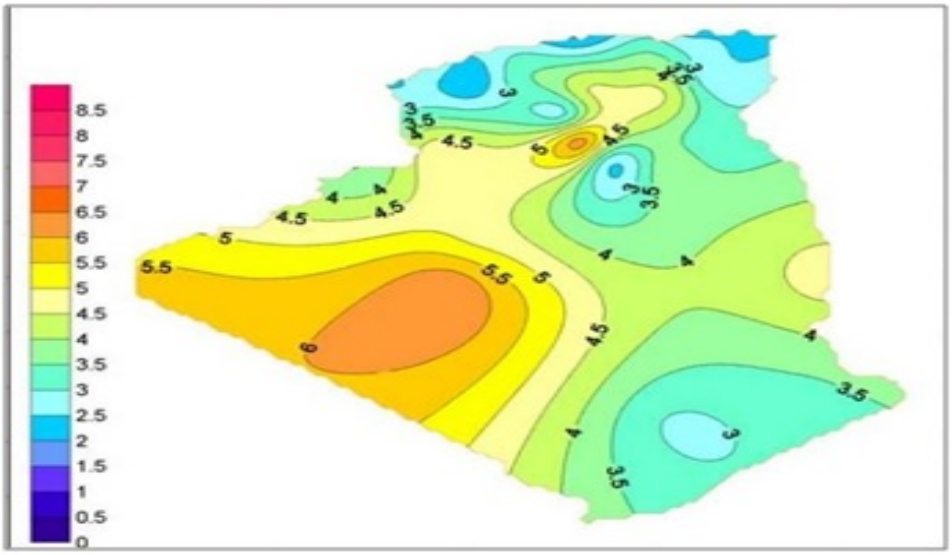


FIGURE 1.30 – Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol [25].

Un programme de traitement de données des mesures de la vitesse du vent élaboré par l'Office Nationale de la Métrologie et le Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER) permet d'établir une carte du vent de l'Algérie (la vitesse moyenne annuelle du vent) comment présenter dans la Figure (1.30).

L'Algérie est généralement très venteuse 78 de sa surface se caractérise par des vitesses supérieures à 3 m/s, avec environ 40 de ces vitesses supérieures à 5 m/s.

Les cartes de vent montrentque les vitesses de vent les plus élevées sont réparties dans le sud tandis que le nord est généralement moins venteux.

On a également constaté que la région sud-ouest présente un grand potentiel avec des vitesses

dépassant 4 m/s pour le site de Bechar, 5 m/s pour le site de Tindouf et même plus de 6 m/s pour le site d'Adrar.

D'autre part, dans le sud-est du pays, on a constaté que le potentiel éolien est relativement plus faible par rapport à la partie ouest où les vitesses les plus élevées de 4,5 m/s ont été observées pour la région d'In-amenass [40].

Enfin, on constate que les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, Bechar et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes. Mais l'exploitation du potentiel éolien de ces régions se heurte souvent à de fortes contraintes d'ordre technique et économique citant entre autres l'éloignement et l'absence de connexion avec le réseau électrique national ce qui entraînerait un investissement plus lourd [40].

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur le système de production d'énergie hybride. premièrement on a commençais par généralités sur les systémes éléctrique hybride nous avons présenté la définition et les avantages et les inconvénients puis les différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes. Ensuit, nous avons présenté les différents composants du système hybride étudié on a commancais par la chaine de production éolienne apree la chaine de production photovoltaique avec Système de stockage et Système de supervision Finalement, nous avons présenté le développement des énergies renouvelables en Algérie ce chapitre est considéré comme une introduction détaillée de notre travailafin d'avoir les aspects généraux nécessaires pour pouvoir entamer la modélisation des composants du SEH, et passer par la suite à la commande, et les résultats de simulations.

Chapitre 2

Modélisation des composants du systéme hybride :

Sommaire

2.1 Introduction : 38
2.2 Les outils de modélisastion : 38
2.3 Modélisation de la chaine de production éolienne : 39
2.3.1 Modélisation du vent : 39
2.3.2 Modélisation de la turbine : 39
2.3.3 Modélisation de l'émulateur éolien : 40
2.3.3.1 Modélisation de la machine à courant continu ; 41
2.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents : 42
2.3.4.1 Mise en équation de la MSAP : 43
2.3.4.2 Equations électriques : 43
2.3.4.3 Passage au repère de Park : 44
2.3.4.4 Modèle de la MSAP dans le repère de Park : 45
2.3.5 Modélisation du redresseur à diodes : 46
2.4 Modélisation de la chaine de production photovoltaïque : 47
2.4.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : 48
2.4.1.1 Modèle à une diode : 48
2.4.1.2 Modèle à deux diodes : 49
2.4.2 Paramètres des cellules photovoltaïques : 50
2.4.2.1 Courant de court-circuit : 50
2.4.2.2 Tension de circuit ouvert : 50
2.4.2.3 Puissance maximale : 51
2.4.2.4 Facteur de forme : 51
2.4.2.5 Rendement : 51

2.4.3 Caractéristiques du module photovoltaïque : 51
2.4.3.1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension : 51
2.4.3.2 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque : 51
2.4.4 L'influence de l'éclairement et de température : 53
2.4.4.1 L'influence de l'éclairement : 53
2.4.4.2 L'influence de la température : 54
2.4.4.3 Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST) : 54
2.5 Modélisation de la batterie : 56
2.5.1 Modèle R-C : 56
2.5.2 Le modèle CIEMAT : 56
2.5.3 Modélisation du hacheur réversible en courant : 58
2.6 Modélisation du bus continu : 58
2.7 Modélisation de l'onduleur triphasé : 59
2.8 Conclusion : 60

2.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons abordé la structure externe d'un systéme hybride , qui sert à produire l'énergie électrique à partir d'un source photovoltaique et éolien.

Dans ce chapitre,nous présenterons la modélisation des composants du système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage.

Un système physique est un ensemble de sous-systèmes ce qui permet de s'intéresser à chaque partie séparément afin de simplifier l'étude avant de faire une synthèse de toutes les parties constituant le système global, C'est pour cette raison que nous allons dans cette partie, commencer par la modélisation de chaine de production éolienne , puis nous allons intéresser à la modélisation de la chaine de production photovoltaique et dernièrement de la modélisation de stockage et les convertisseurs statiques.

2.2 Les outils de modélisastion :

Le système d'énergie hybride proposé est un systéme autonome composée de la combinaison de deux sources d'énergie : photovoltaïque, éolienne plus le dispositif de stockage. Tous ces éléments sont connectés à un bus DC, afin d'alimenté une charge principale de type (DC) et des charges supplémentaires(AC). Selon la figure (2.1), nous avons :

⇒ Le système éolien se composant par un émulateur du vent,une géneratrice synchrone à aimants permanents, un convertisseur de type AC/DC et un hacheur boost qui permet d'obtenir le maximum de puissance de l'éolien .

⇒Le système PV formé de plusieurs panneaux photovoltaïques connectés au bus DC via un hacheur du type élévateur qui permet d'obtenir le maximum de puissance du GPV grâce à l'utilisation d'un algorithme MPPT.

⇒ Le système de stockage(La batterie) est reliée au bus DC à travers un convertisseur réversible en courant, il contrôle l'intensité du courant délivré ou consommé par la batterie tout en assurant une adaptation de la tension entre la batterie et le bus DC.

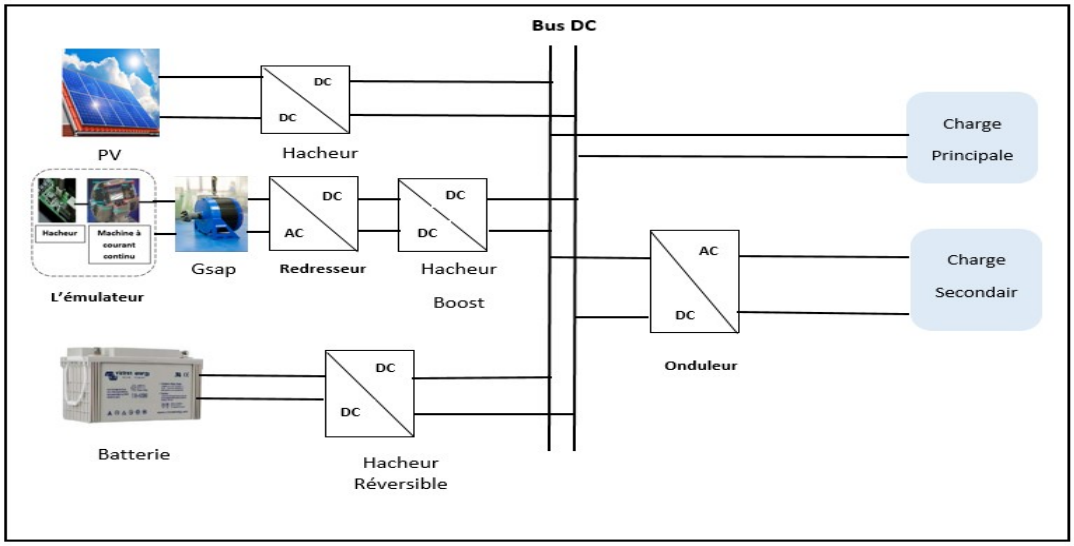


FIGURE 2.1 – Architecture du système d'énergie hybride étudié.

2.3 Modélisation de la chaine de production éolienne :

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne comme présenté par la Figure (2.2) est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien,Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et statique en simulant le comportement du système global.

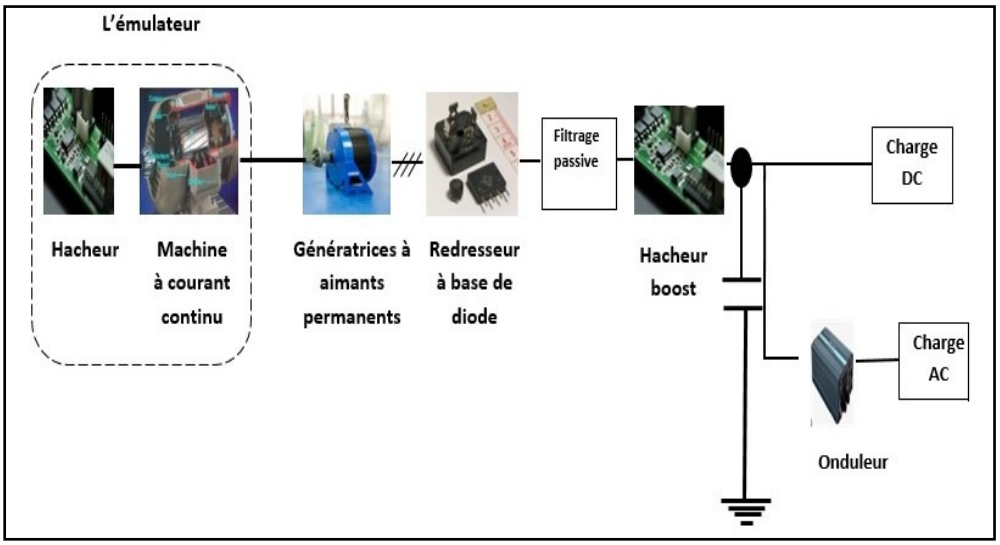


FIGURE 2.2 – Chaîne de conversion d'énergie éolienne.

2.3.1 Modélisation du vent :

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La définition du ce modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourrier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques est donné par l'équation 2.1 :[25]

$$\boxed{v_{(t)} = A + \sum \alpha k \sin\left(wkt\right)} \tag{2.1}$$

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent par une somme de plusieurs harmoniques décrit comme suit :

$$\boxed{v_{(t)} = 6 + 0,2\sin(0,1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0,2\sin(3.6645t)} \tag{2.2}$$

2.3.2 Modélisation de la turbine :

L'application d'un vent V sur les pales de l'éolienne produit la rotation de l'éolienne et la transmission d'une puissance mécanique a l'arbre de la turbine,Cette puissance s'exprime par la relation suivante : [26]

$$\boxed{P_m = \frac{1}{2}\rho C_p(\beta, \lambda)\rho\pi R^2 V^3} \tag{2.3}$$

Le rapport de vitesse c'est le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\boxed{\lambda = \frac{R\Omega_t}{V}} \tag{2.4}$$

Pour notre exemple, le coefficient de puissance Cp est donné par la relation suivante [31] :

$$\boxed{C_p(\beta,\lambda) = C_1(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4)\exp(\frac{-C_5}{\lambda_1}) + C_6\lambda} \tag{2.5}$$

$$\boxed{\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0356}{\beta^2+1}} \tag{2.6}$$

Avec :

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

2.3.3 Modélisation de l'émulateur éolien :

L'émulateur du vent est une association d'une machine à courant continu connecté avec un hacheur, le but de l'émulateur est de remplacer le vent et la turbine éolienne afin d'émuler le comportement de cette turbine, l'image de la vitesse générée par la turbine est appliquée en référence à la MCC accouplée a la génératrice . [26]

⇒La figure 2.3 présente la structure de l'émulateur éolien a étudié.

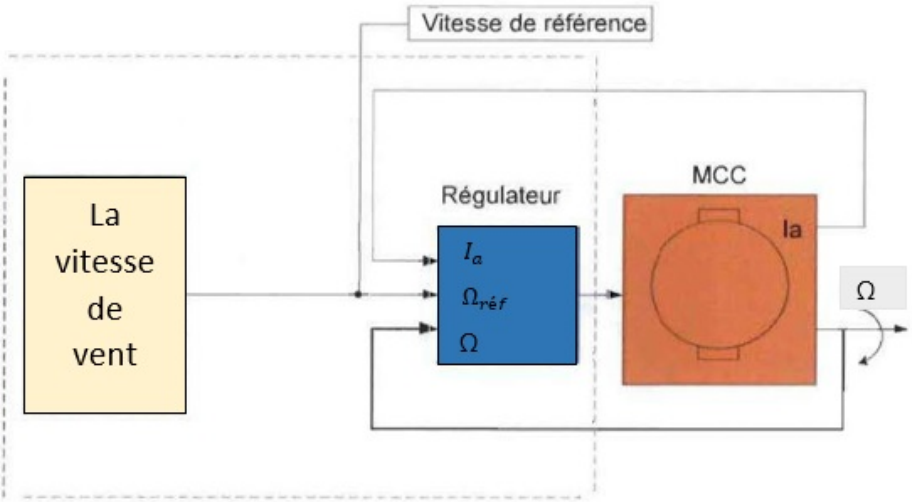


FIGURE 2.3 – la structure de l'émulateur éolien.

2.3.3.1 Modélisation de la machine à courant continu ;

Pour notre travail on doit utilise une MCC à excitation séparée représentée dans la figure suivante :[26]

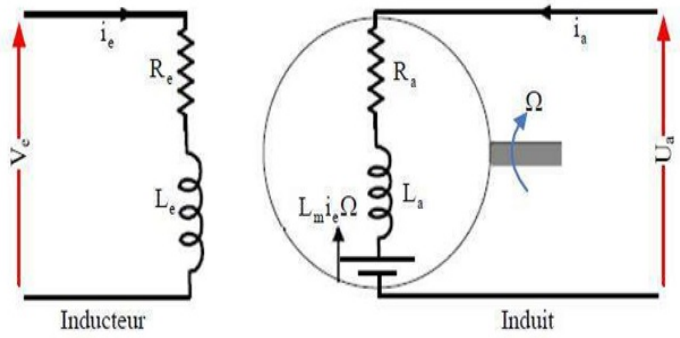


FIGURE 2.4 – Modèle électrique de la MCC à excitation séparée.

⇒La machine à courant continu (MCC) à excitation séparée peut être modélisée par ses équations :électriques ,mécaniques ,électromécaniques

I **.Partie électrique de la machine :**

Prenant en compte la résistance $R_a$et l'inductance $L_a$du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension induite s'écrit :

$$\boxed{\mathrm{U}_{\ a} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E} \tag{2.7}$$

II **.Partie électromagnétique de la machine :**

Pour la machine à courant continu à excitation séparée,si le flux crée par le bobinage inducteur est constant ,la force électromotrice (FEM) et le couple électromagnétique sont :

$$\boxed{\mathrm{E{=}K\Omega}\ C_{em} = K i_a} \tag{2.8}$$

III **.Partie magnétique de la machine :**

l'équation mécanique peut s'écrire comme suit :

$$\boxed{C_{em} - C_r = J\frac{d\Omega}{dt} + f\Omega} \tag{2.9}$$

IV **.Stratégie de commande de la machine à courant continu :**

À la sortie du modèle de la turbine on a une vitesse de rotation. Elle représente la vitesse de rotation de référence à laquelle on souhaite asservir la vitesse de rotation de la machine.

L'objectif de la commande à réaliser est d'asservir la vitesse en dépit du couple résistant et ce au moyen des mesures du courant d'induit et de la vitesse de rotation de la machine , Les régulateurs utilisés pour la commande du système seront du type proportionnel intégral (PI), pour sa simplicité et afin de réduire l'erreur statique, Le régulateur comprendra deux structures en cascade : une boucle interne régulant le courant de la machine et une boucle externe contrôlant la vitesse de rotation de la machine (Figure 2.5).

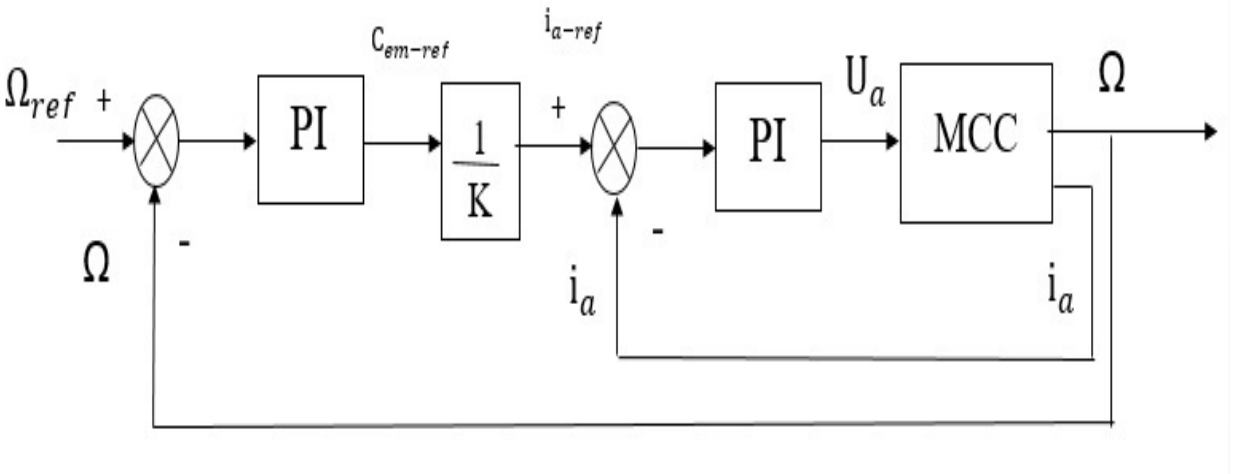


FIGURE 2.5 – Schéma bloc du régulateur

La boucle interne sera 10 fois plus rapide que la boucle externe afin d'avoir une bonne régulation,En utilisant la méthode d'imposition des pôles le régulateur PI pour la boucle de vitesse et boucle de courant dont donnés par le tableau suivant :

PI	Boucle de vitesse	Boucle de courant
K_p	2ρJ-f	$2\rho L_a - R_a$
K_i	$2\rho^2$J	$2\rho^2 L_a$

TABLE 2.1 – Les paramétres de boucle de vitesse et courant.

2.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone à aimant permanent est intéressante surtout pour les applications isolées et autonomes. L'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses simplificatrices :[27]

1. La bobine de stator connectée en étoile, neutre dans l'air pour éliminer l'élément homopolaire des courants.

2. La saturation du circuit magnétique est négligée, elle aboutit à l'expression des flux magnétiques en tant que fonctions linéaires des courants des phases.
3. La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
4. Les pertes par hystérésis, par courants de Foucault et l'effet de peau sont négligées.

2.3.4.1 Mise en équation de la MSAP :

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes, d et q.

Dans le repère classique, il y'a trois axes orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine.

D'habitude, l'axe de la phase a (as) est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, un seul axe portant un enroulement qui schématise l'aimant permanent (d'indice F correspondant à la direction de l'aimantation). L'angle θdonne la position du rotor par rapport au stator.

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante :

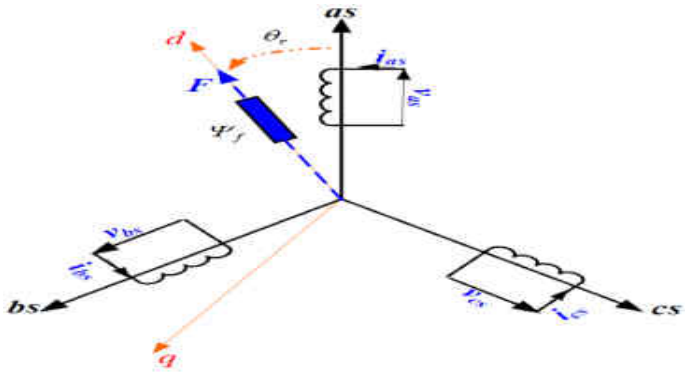


FIGURE 2.6 – Schéma représentatif de la MSAP à modéliser

2.3.4.2 Equations électriques :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

$\Rightarrow [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^t$: Vecteur tension de phases statoriques

$\Rightarrow [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^t$: Vecteur courant de phases statoriques

$\Rightarrow [\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^t$: Vecteur des flux totaux traversent les bobines statoriques

$\Rightarrow R_s$:La résistance des phases statoriques

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire,Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux,elle n'intervient pas dans le couple,Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

2.3.4.3 Passage au repère de Park :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère, Ce changement s'effectue grâce à une transformation mathématique, qui transforme les trois bobines statoriques déphasées de $\frac{2\Pi}{3}$en deux bobines fictives équivalentes diphasées de$\frac{\Pi}{2}$ et situées sur le rotor Figure (II.6) :

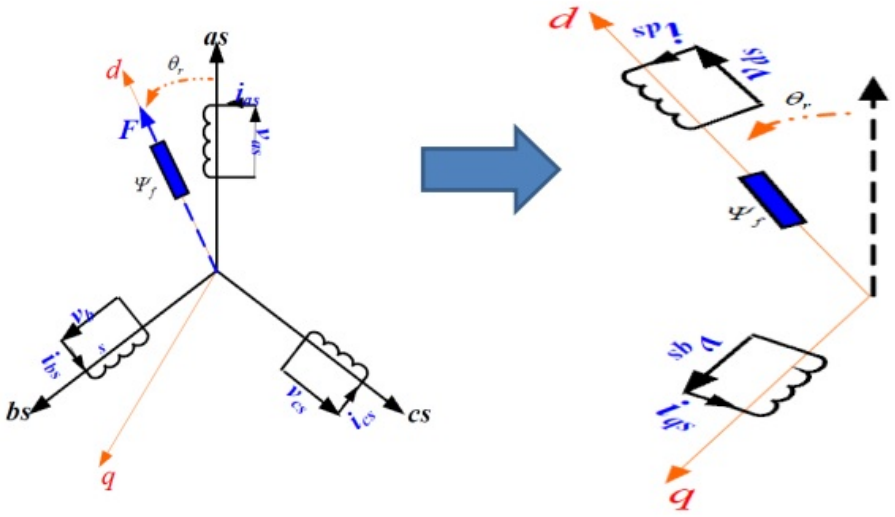


FIGURE 2.7 – Transformation triphasée- diphasée

La transformation de Park $P(\theta_r)$ est définie par la matrice suivante :

$$[P(\theta_r)]) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 2\Pi/3) & \cos(\theta_r + 2\Pi/3) \\ sin(\theta_r) & sin(\theta_r - 2\Pi/3)1 & sin(\theta_r + 2\Pi/3) \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

$P(\theta_r)$Définie le passage du repère (d, q, o) vers (a, b, c)

$$[P(\theta_r)])^{-1} = \sqrt{2/3}\begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & sin(\theta_r) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta_r - 2\Pi/3) & sin(\theta_r - 2\Pi/3) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta_r + 2\Pi/3) & sin(\theta_r + 2\Pi/3) & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

$P(\theta_\sigma)^{-1}$définie le passage du repère (a, b, c)vers (d, q, o).

On définit aussi une autre transformation qui est celle de Concordia qui définit d'autres axes fictifs tel que l'axe est confondu avec l'axe as ce qui revient à poser $\theta_r$dans la transformation de Park

$$C = \sqrt{2/3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

2.3.4.4 Modèle de la MSAP dans le repère de Park :

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la Figure II.6, le modèle de la MSAP est définit par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

I **.Equations électriques de la machine :**

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_q i_{qs} \tag{2.14}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \varphi_f \tag{2.15}$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_{qs} \tag{2.16}$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \varphi_f \tag{2.17}$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation

II **.Equations magnétiques de la machine :**

$$\varphi_{ds} = L_d i_{ds} + \varphi_f \tag{2.18}$$

$$\varphi_{qs} = L_q i_{qs} \tag{2.19}$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct(φ_{ds})et d'axe en quadrature(φ_{qs})sont fonction linéaire des courants($i_{ds}\ eti_{qs}$)d'axes direct et de en quadrature.

III **. Expression du couple électromagnétique :**

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$p(t) = (v_{ds}\ \ i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \tag{2.20}$$

En remplaçant($v_{ds}etv_{qs}$)par leurs expressions on aura :

$$p(t) = [-R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) - (i_{ds}\frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs}\frac{d\varphi_{qs}}{dt}) + \frac{d\theta_r}{dt}(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})] \tag{2.21}$$

avec :

$\Rightarrow$le premier terme($-R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)$:Représente la puissance dissipée par effet Joule

$\Rightarrow$le deuxieme terme($i_{ds}\frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs}\frac{d\varphi_{qs}}{dt}$) :La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator

$\Rightarrow$le troixieme terme($\frac{d\theta_r}{dt}(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})$:La puissance électromagnétique.

Sachant que :

$P = C_{em}\Omega$ et $\omega = p\Omega$ alors on obient :

$$\boxed{C_{em} = p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})} \tag{2.22}$$

Après l'affectation des valeurs de flux on aura :

$$\boxed{C_{em} = p((L_d - L_q)i_{ds}i_{qs} + (\varphi_f i_{qs})} \tag{2.23}$$

IV **.Equations mécaniques :**

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$\boxed{C_m - C_{em} - f\Omega = \frac{d\Omega}{dt}} \tag{2.24}$$

2.3.5 Modélisation du redresseur à diodes :[14]

Le redresseur est un convertisseur statique qui assure la transformation d'énergie d'une source alternative en énergie continu, comme le montre la figure(2.8) :

Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension : la valeur instantanée de la tension redressée peut être exprimée par :

$$V_a(t) = V_{max}sin(\omega t)$$

$$\begin{aligned} \mathrm{V_b}(t) &= V_{max}sin(\omega t - 2\Pi/3) \\ \mathrm{Vc}(t) &= V_{max}sin(\omega t + 2\Pi/3) \end{aligned} \tag{2.25}$$

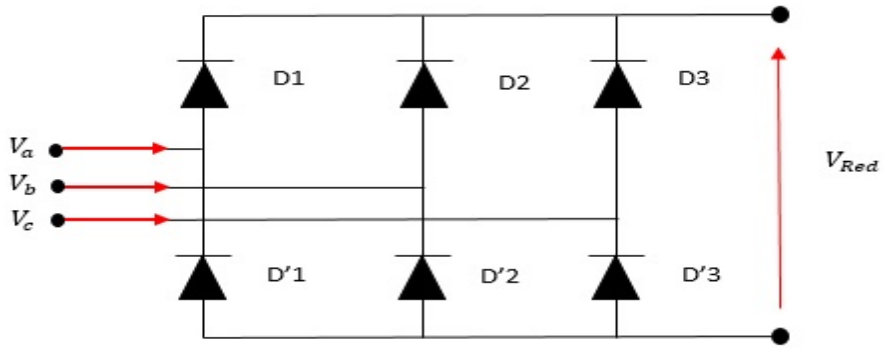


FIGURE 2.8 – Schéma du redresseur à diodes

On a Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément :

⇒Lorsque D_1 conduit et D'$_3 conduitégalement. Il vient que conduit lorsque$ $V_a > V_b > V_c$,Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

⇒D_i conduit si :

$$V_i = Max(V_j); j = a, b, c; i = a, b, c \tag{2.26}$$

⇒ D'_i conduit si :

$$V_i = Min(V_j); j = a, b, c; i = a, b, c \tag{2.27}$$

Pendant chaque séquence de conduction, La tension redressée à la sortie du redresseur est :

$$\boxed{V_{red}(t) = MaxV_j - Min(V_j); j = a, b, c} \tag{2.28}$$

⇒Sa valeur moyenne est donnée par :

$$\boxed{(\mathrm{V}_{red})_{moy} = (3\sqrt{2}/\Pi)V_{max}} \tag{2.29}$$

2.4 Modélisation de la chaine de production photovoltaïque :

Nous présentons dans ce partie la modélisation des composants de la chaine de production photovoltaïque :

⇒modélisation de module PV

⇒convertisseur (DC/DC)

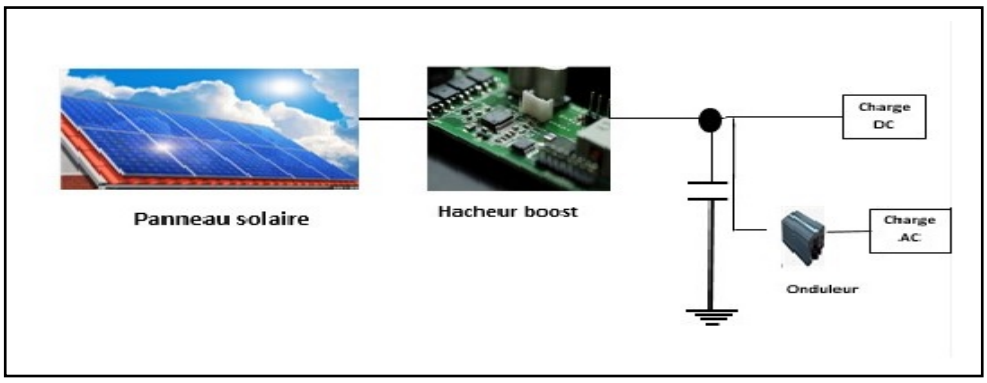


FIGURE 2.9 – chaine de conversion d'énergie photovoltaïque

2.4.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode.

2.4.1.1 Modèle à une diode :

La cellule photovoltaïque est représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode comme le montre la figure suivante :

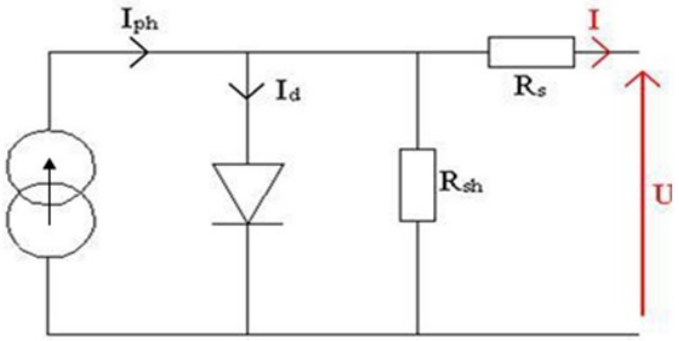


FIGURE 2.10 – Modèle électrique d'une cellule solaire avec une seule diode et une résistance shunt.

La loi des noeuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$\boxed{I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh}} \tag{2.30}$$

A partir de ce circuit, on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque sous les conditions de l'éclairement$G = 1000[W/M^2]$ et température$T = 25[\check{r}C]$

. Le courant dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$\boxed{I_{Rsh} = \frac{V_c + I \times R_s}{R_{sh}}} \tag{2.31}$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$\boxed{I_d = I_s[exp^{\frac{q(V_c+R_s\times I)}{nkT_{ck}}} - 1]} \tag{2.32}$$

L'expression du courant I devient alors :

$$\boxed{I = I_{cc} - I_s[exp^{\frac{q(V_c+R_s\times I)}{nkT_{ck}}} - 1] - \frac{V_c + I \times R_s}{R_{sh}}} \tag{2.33}$$

Avec la température de la jonction de la cellule est :

$$\boxed{T_{ck} = T_a + (NOCT - 20)\frac{G_i}{800}} \tag{2.34}$$

NOCT(Nominal Operating Cell Temperature) : température nominale de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes :

⇒un ensoleillement de$800W/m^2$

⇒une température ambiante de20ř

⇒ une masse d'air optique AM égale à 1.

2.4.1.2 Modèle à deux diodes :

La figure suivante représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par :

⇒ la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{s1} et I_{s2} et de facteurs de diode n_1 et n_1.

⇒une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire.

⇒la résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. Sa valeur peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour la tension à circuit ouvert V_{co}.

⇒La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction.

L'expression du courant I devient alors :

$$\boxed{I = I_{cc} - I_{s1}[exp^{\frac{q(V_c+R_s\times I)}{n_1kT_{ck}}} - 1] - I_{s2}[exp^{\frac{q(V_c+R_s\times I)}{n_2kT_{ck}}} - 1] - \frac{V_c + I \times R_s}{R_{sh}}} \tag{2.35}$$

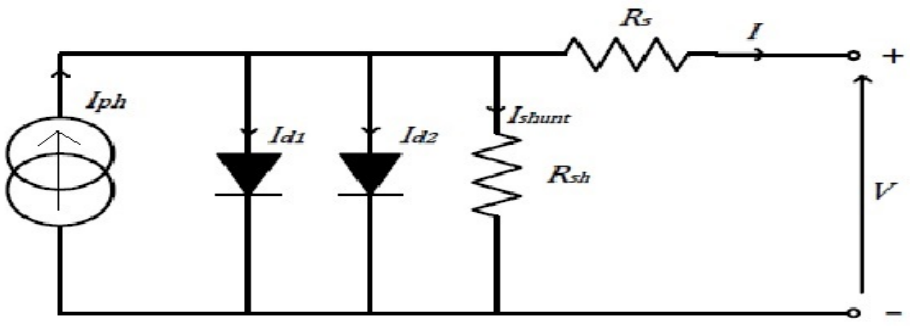


FIGURE 2.11 – Modèle électrique d'une cellule solaire avec une à deux diodes et une résistance shunt.

2.4.2 Paramètres des cellules photovoltaïques :

Les paramètres des cellules photovoltaïques I_{cc} , V_{co} , P_{max}, FF, et η) , extrait des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairéesdans des conditions identiques.

2.4.2.1 Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux $V = 0$. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant Iph dans le cas contraire en annulant V dans l'équation (3.4), on obtient :

$$\boxed{I = I_{cc} - I_s[exp^{\frac{q(R_s \times I)}{nkT_{ck}}} - 1] - \frac{I \times R_s}{R_{sh}}} \tag{2.36}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le Terme :

$$\boxed{I_s[exp^{\frac{q(R_s \times I)}{nkT_{ck}}} - 1] devant I_{ph}} \tag{2.37}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

2.4.2.2 Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de la cellule est nul. Il est lié à la résistance shunt, lorsque cette dernière n'est pas connectée ou connectée mais sa valeur est infinie [43]. La valeur de cette tension diminue avec la température et dépend de L'éclairement de la cellule, Il reflète la tension de la cellule dans la nuit .

$$\boxed{V_{co} = \frac{mkT_{ck}}{q} ln \frac{I_{ph}}{I_s} = V_t ln \frac{I_{ph}}{I_s}} \tag{2.38}$$

Avec : $\frac{mkT_{ck}}{q} = V_t$ est connu sous le nom de tension thermique et T_{ck} est la températureabsolue de la cellule..

2.4.2.3 Puissance maximale :

Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max} , V_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre0et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}) donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit $(V \times I)$:

$$\boxed{P_{max} = V_{max} \times I_{max}} \tag{2.39}$$

2.4.2.4 Facteur de forme :

On appelle facteur de forme ff ($fill - factor$), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite $P_{max} = V_{max} \times I_{max}$ de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} \times V_{co}$ [44].

$$\boxed{FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{I_{cc} \times V_{co}}} \tag{2.40}$$

Le Fill Factor est la mesure réelle de la caractéristique $I - V$. Sa valeur est supérieure à $0,7$ pour une bonne cellule. Il diminue lorsque la température de la cellule est augmentée.

2.4.2.5 Rendement :

Le rendement η , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in}.

$$\boxed{\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{A \times G_a}} \tag{2.41}$$

2.4.3 Caractéristiques du module photovoltaïque :

Dans notre travail nous avons utilisé la cellule PV de type Kyocera KC200GT pour la modélisation. Le module PV comporte 54 cellules connectées en série pour offrir une puissance de 200 (W)

2.4.3.1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension :

La figure suivante illustre respectivement les caractéristiques courant-tension et de puissance dans les conditions standard ($G = 1000W/m^2; T = 25C°$).

⇒ La courbe caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit (tension nulle correspondante au courant maximal) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de panneau).

⇒ La courbe caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque représente a puissance électrique P_{pv} disponible aux bornes d'un panneau photovoltaïque est égale au produit du

courant photovoltaïque fourni $I_{pv} par la tension à ces bornes donnée\ V_{pv}$.

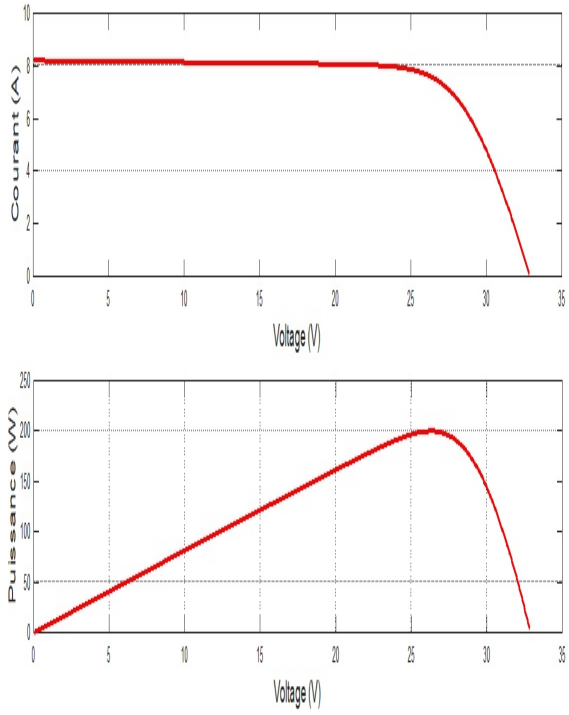


FIGURE 2.12 – Caractéristiques courant-tension et puissance-tension

2.4.3.2 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque [45] :

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et de façon générale des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur *PV* et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement .

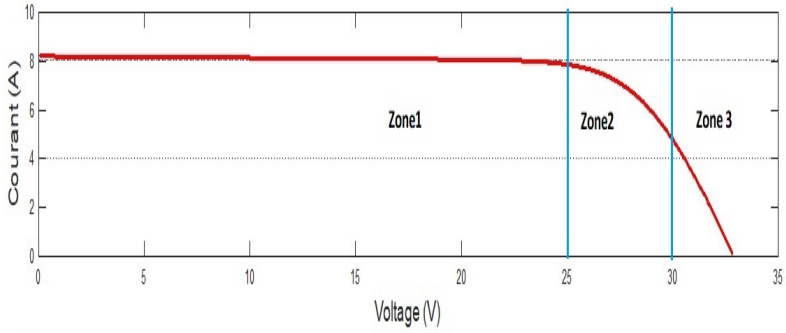


FIGURE 2.13 – zones de fonctionnement du module photovoltaïque.

La caractéristique d'un module *PV* constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas déséquilibre entre les caractéristiques de

chaque cellule (irradiation et température uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV en trois zones :

⇒Zone 1 :Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, l'admittance interne pouvant être modélisée par $\frac{1}{R_{sh}}$.

⇒Zone 2 :Une zone assimilable à un générateur de tension Uco d'impédance équivalente à la résistance série R_s.

⇒Zone 3 :Une zone ou l'impédance interne du générateur varie très fortement de $R_s et R_{sh}$.

C'est dans la zone 2 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par couple (I_{max}, V_{max}), et seule une charge dont de caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la paissance maximale disponible dans les conditions considérées.

2.4.4 L'influence de l'éclairement et de température :

2.4.4.1 L'influence de l'éclairement :

Les figures (2.14) et (2.15) représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV pour une température constante de (25($°C$)) et pour différente intensité rayonnante de (400, 600, 800 et 1000(W/m^2)).

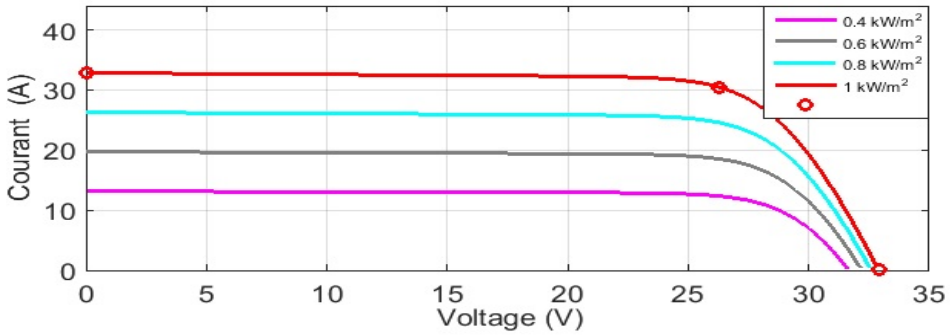


FIGURE 2.14 – L'influence de l'éclairement sur la caractéristique Courant-tension.

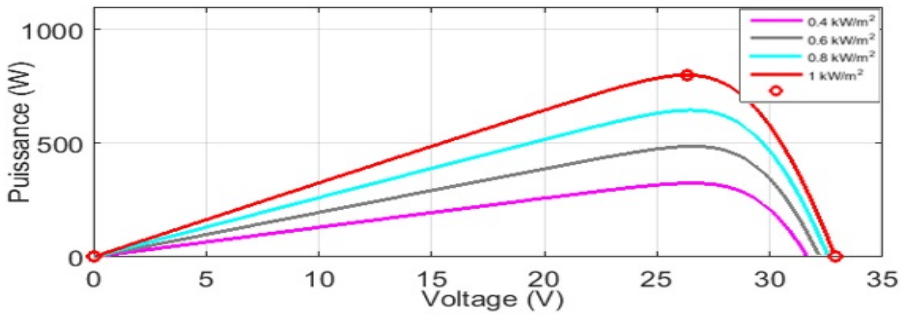


FIGURE 2.15 – Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements..

D'après les résultats de la simulation on peut dire que les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions météorologiques, particulièrement l'ensoleillement et la température. Cela nécessite donc une commande pour extraire le maximum de puissance quelque-soit ces paramètres.

2.4.4.2 L'influence de la température :

Les figures (2.16) et (2.17) présentent respectivement des courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (25, 50, 75, et 100($°C$) :

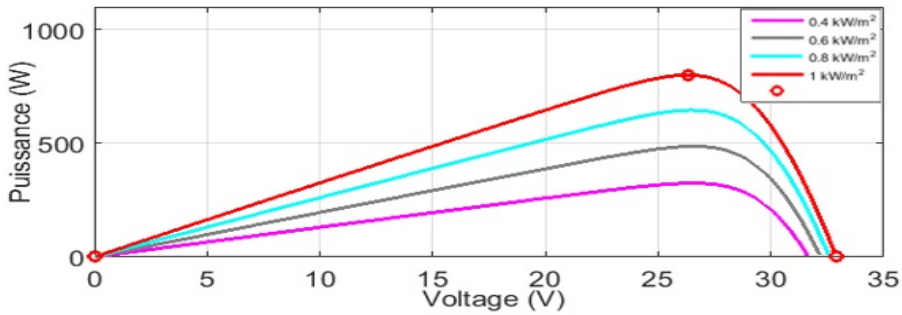


FIGURE 2.16 – L'influence de l'éclairement sur la caractéristique Courant-tension.

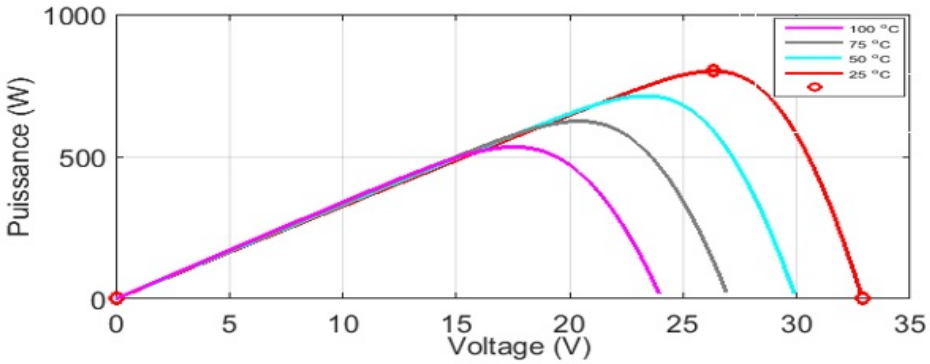


FIGURE 2.17 – Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements..

On constate que lorsque la température croit à irradiation constante ($1000W/m^2$) la tension de circuit ouvert décroît fortement et le courant de court-circuit augmente légèrement. L'augmentation de la température se traduit au total par une diminution de la puissance maximale disponible.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ $0,5\%$ degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 (°C) .

2.4.4.3 Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST) :

Le convertisseur boost, comme le montre dans la figure (2.18), est aussi connu comme le convertisseur élévateur "step-up".

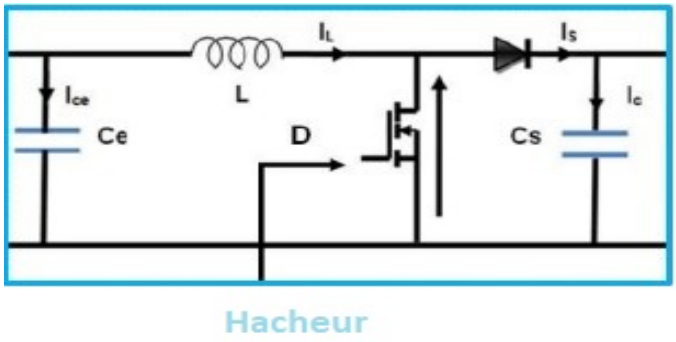


FIGURE 2.18 – Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.

Le nom implique son application typique de la conversion d'une faible tension d'entrée à une haute tension de sortie, l'essentiel le fonctionnement est l'inverse d'un convertisseur buck. Il est utilisé pour réaliser des alimentations faibles puissance de type DC/DC.

le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un hacheur survolteur, qui jouera le rôle d'adaptateur source–bus DC à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale. .

⇒ Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases de commutation selon l'état de l'interrupteur K (ouvert/fermé).Chaque état est représenté par une équation différentielle.

Pour la première période : K est fermé

$$0 = c\frac{dv_c}{dt} + \mathrm{i}d_C \tag{2.42}$$

$$Vpv = \mathrm{L}\frac{D\, i_L}{dt} \tag{2.43}$$

Pour la deuxième période : K est ouvert

$$L = c\frac{dv_c}{dt} + \mathrm{i}d_C \tag{2.44}$$

$$Vpv = L\frac{D\, i_L}{dt} + Vd_C \tag{2.45}$$

⇒ Nous considérons que les interrupteurs utilisés dans cette étude sont parfaits. Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations (II.15) :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{Vpv}{L} - (1-D)\frac{Vd_C}{L} \tag{2.46}$$

$$\frac{Vd_C}{dt} = -\frac{Id_c}{c} + (1-D)\frac{I_L}{dt} \tag{2.47}$$

Avec D : le rapport cyclique En valeur moyenne, la tension de sortie est fonction de la tension

d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est la suivante :

$$\boxed{Vd_C = \frac{1}{1-\alpha} Vpv} \tag{2.48}$$

Et celle du courant :

$$\boxed{Id_C = (1-\alpha) I_L} \tag{2.49}$$

2.5 Modélisation de la batterie :

Il existe plusieurs variantes de batteries au plomb-acide, chacune réagissant différemment en fonction des applications et des contraintes auxquelles elles sont soumises. Par conséquent, il n'existe pas de modèle unique qui puisse être considéré comme parfait dans toutes les situations. Pour notre étude, nous avons sélectionné deux modèles afin de déterminer celui qui convient le mieux à nos besoins. [46] :

2.5.1 Modèle R-C :

Le schéma R-C est composéune fem E_0 qui symbolise la tension sans charge de la batterie, d'un condensateur qui représente la capacité interne de la batterie (C_{batt}), et d'une résistance interne(R_s). ⇒Nous avons donc :

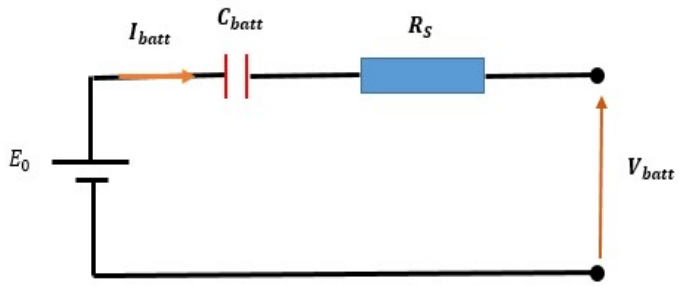


FIGURE 2.19 – Modèle R-C de la batterie.

$$\boxed{V_{batt} = E_0 - R_s + I_{batt} - V_{Cbatt}} \tag{2.50}$$

On définit également l'état de charge (E_{DC})de la batterie par :

$$\boxed{E_{DC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}}} \tag{2.51}$$

2.5.2 Le modèle CIEMAT :

Ce modèle est basé sur les deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres : Le modèle de la capacité donne la quantité

d'énergie C_{batt}que peut restituer la batterie, en fonction du courant moyen de décharge I_{batt}. Son expression est établie à partir du courant C_{10}Correspondant au régime de fonctionnement I_{10}[47][48].

$$\boxed{ED\frac{C_{10}}{C_{batt}} = \frac{1.67}{1 + 0.67\left(\frac{I_{batt}}{I_{10}}\right)^{0.9}}(1 + 0.005 \times \Delta t)} \tag{2.52}$$

⇒L'expression générale de la tension batterie :

$$\boxed{V_{batt} = n_b E_b + n_b R_b I_{batt}} \tag{2.53}$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes :

— La tension en décharge :

$$\boxed{V_{batt-déch} = n_b[1.965 + 0.12EDC] - n_b\frac{|I_{batt}|}{C_{10}}\left(\frac{4}{1 + (|I_{batt}|)^{0.3}} + \frac{0.27}{(1 - EDC)^{1.5}} + 0.02\right)} \tag{2.54}$$

— La tension en charge :

$$\boxed{V_{batt-char} = n_b[2 + 0.16EDC] + n_b\frac{|I_{batt}|}{C_{10}}\left(\frac{6}{1 + (|I_{batt}|)^{0.96}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036\right)(1 - 0.025 \times \Delta t))} \tag{2.55}$$

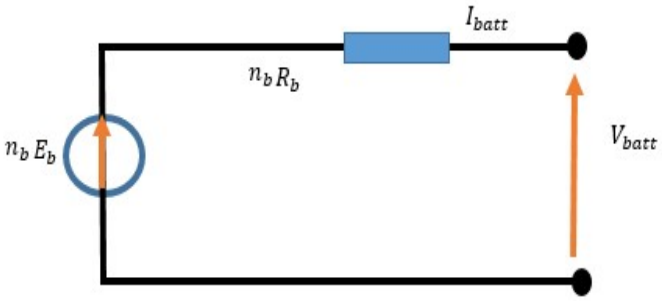


FIGURE 2.20 – Modèle CIEMAT de la batterie.

2.5.3 Modélisation du hacheur réversible en courant :

Le hacheur utilisé pour effectuer la charge et la décharge de la batterie doit permettre un transfert de puissance (courant) réversible. Son schéma électrique est représenté dans la figure (2.21)

Le convertisseur bidirectionnel joue un double rôle en fonctionnant à la fois comme un convertisseur élévateur (boost) lors de la décharge de la batterie et comme un convertisseur abaisseur (buck) lors de la charge de la batterie. Dans les deux modes (charge et décharge), ce convertisseur régule la tension du bus DC et contrôle le flux de puissance.

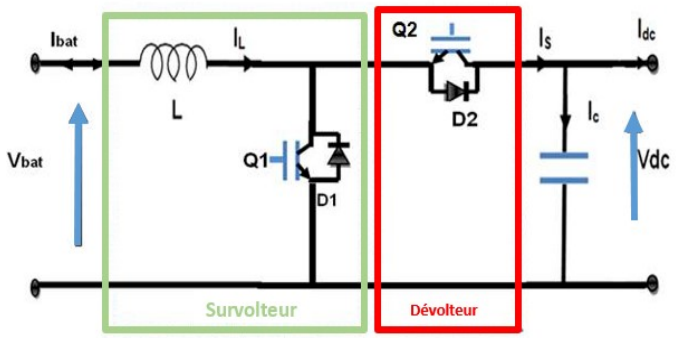


FIGURE 2.21 – Hacheur réversible en courant

Il est important de noter que la commande des interrupteurs Q1 et Q2 est effectuée simultanément à l'aide de deux signaux complémentaires (rapports cycliques) D et (1 - D). Le modèle du convertisseur bidirectionnel est décrit par un système d'équations.

$$\boxed{\frac{dI_{batt}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{bat} - DV_{dc})} \tag{2.56}$$

$$\boxed{\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}}(DI_l - I_{dc})} \tag{2.57}$$

2.6 Modélisation du bus continu :

En règle générale, dans la modélisation, le bus continu est généralement considéré comme une capacité. Après avoir décrit tous les modèles élémentaires, nous avons ensuite réalisé le couplage des sources en fonction de la configuration à bus continu, comme illustré dans la figure ci dessus :

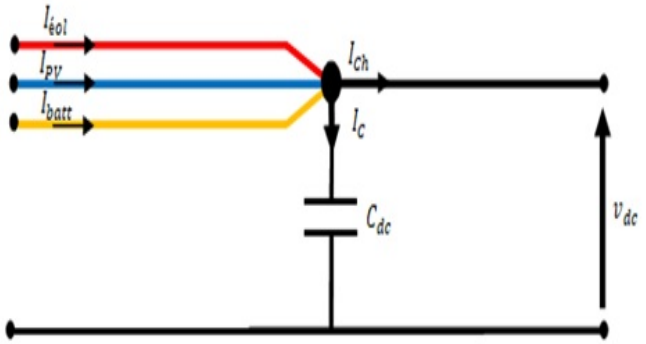


FIGURE 2.22 – Modèle du bus continu

⇒ Le courant dans le bus continu est donné par :

$$\boxed{\mathrm{I}_C = \frac{C}{dV_{dC}}dt} \tag{2.58}$$

$$\boxed{I_C = I_{pv} + I_{éol} \pm I_{batt} - I_{ch}} \tag{2.59}$$

2.7 Modélisation de l'onduleur triphasé [38] :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courant, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération comme le montre le schéma ci-dessous :

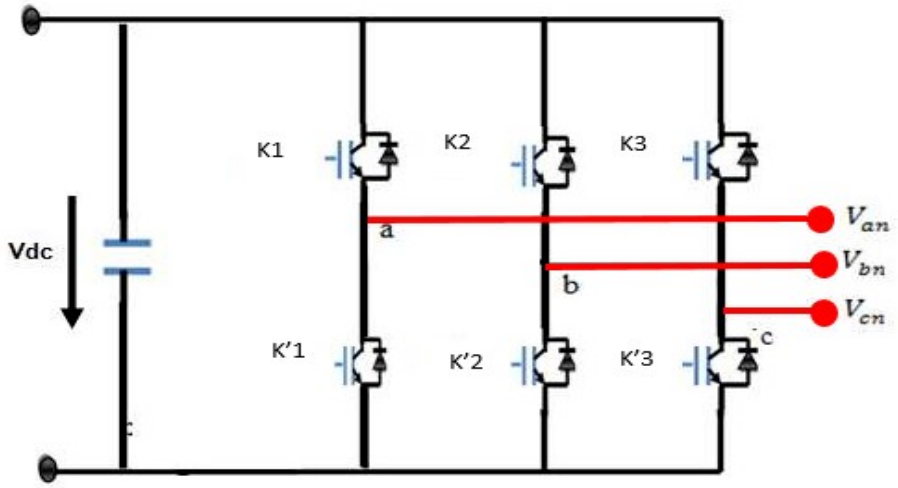


FIGURE 2.23 – Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

⇒La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \tag{2.60}$$

⇒Avec : S'_a, S'_b, S'_c : Sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égale à 1 si l'interrupteur est fermé ou égale à 0 dans le cas contraire).

2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons présenté la conception de notre système hybride comprenant un générateur solaire photovoltaïque, un générateur éolien, un système de stockage et des convertisseurs statiques. Tous ces composants sont connectés via un bus continu afin de fournir de l'énergie à une charge en courant continu ou alternatif. Les modèles des convertisseurs électriques développés dans cette section seront utilisés pour contrôler et optimiser la production d'énergie des sources photovoltaïque et éolienne.

Dans le prochain chapitre, nous examinerons le contrôle de tous les sous-systèmes, ainsi que l'optimisation de leur production d'énergie.

Chapitre 3

Commande et Simulation d'un Systéme Hybride :

Sommaire

3.1 Introduction : **62**
3.2 Description des algorithmes MPPT : **62**
3.3 Commande de la chaine de conversion éolienne : **63**
3.3.1 La commande en couple : 63
3.4 Simulation de la chaine de conversion éolienne : **65**
3.5 Les Résultats de Simulation de la chaine de conversion éolienne : . . . **66**
3.6 Commande de la chaine de conversion photovoltaïque : **70**
3.6.1 Méthode de perturbation et d'observation ($P\&O$) : 70
3.7 Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque : **72**
3.8 Les Résultats de Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque : **72**
3.9 Le bus continu DC : **75**
3.10 Stratégies de commande MLI de l'onduleur : **76**
3.11 Conclusion : **78**

3.1 Introduction :

Dans le deuxième chapitre, nous avons donné les modèles mathématiques de notre système . Dans ce chapitre, nous allons synthétiser les commandes nécessaires et présenter les résultats obtenus après la simulation de chaque composant de ce système hybride isolé. Ce chapitre est organisé de la manière suivante : Dans une première partie, nous devons maximiser la production des sources d'energie renouvlable (PV et éolien) en appliquant les algorithmes MPPTet La deuxième partie concerne le contrôle de la tension du bus DC à une valeur de référence par le système de stockage et le contrôle de l'onduleur par une commande .

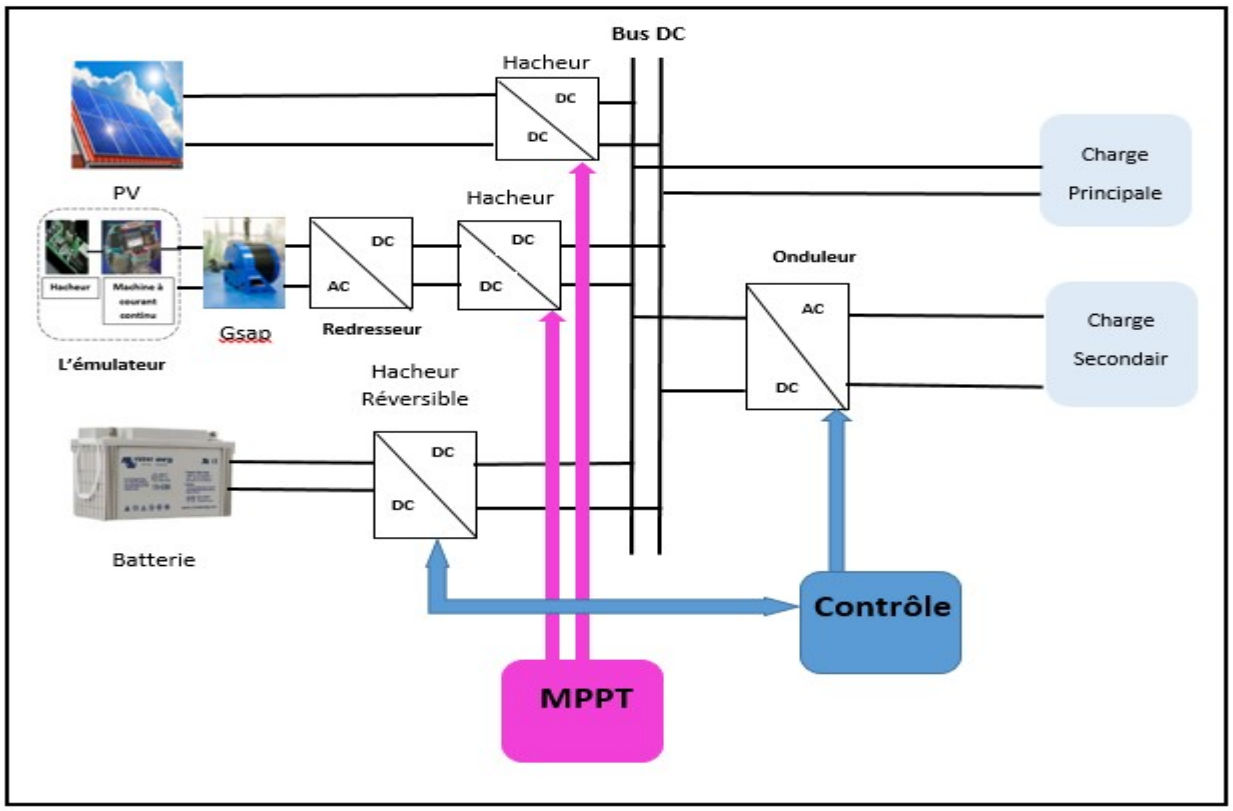


FIGURE 3.1 – Schéma du Systémé global.

3.2 Description des algorithmes MPPT : [3]

Afin de maximiser la production d'énergies renouvelables (PV et éolien), nous devons appliquer à chacune d'entre elles un Algorithme de suivi du point de puissance maximale, communément appelé MPPT. Par définition, la commande MPPT est une stratégie d'optimisation, et elle consiste à rechercher Le point de fonctionnement maximum du système et son fonctionnement proche de celui-ci.

3.3 Commande de la chaine de conversion éolienne :[7][28]

La puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur présente une forme de cloche, représentée dans la figure 3.1 Les sommets de ces caractéristiques représentent les points optimaux recherchés, définissant ainsi une courbe de puissance optimale : La commande MPPT pour

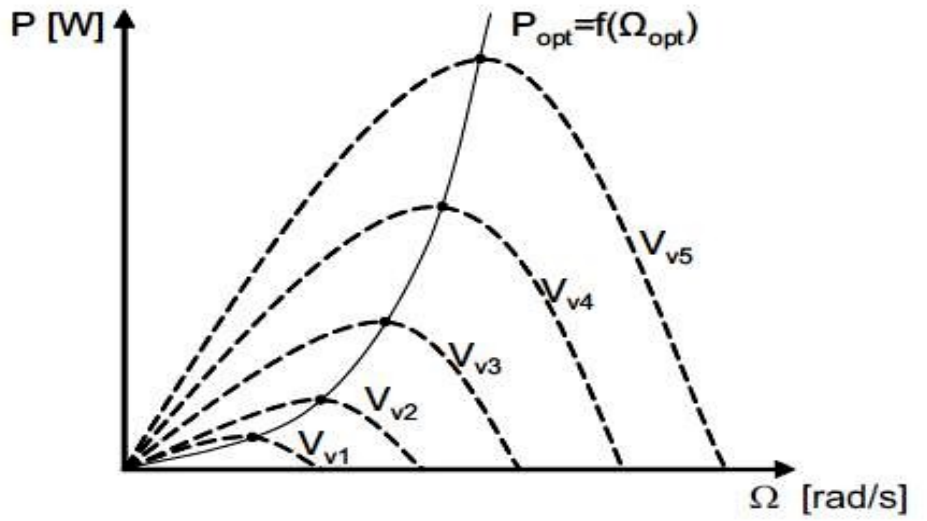


FIGURE 3.2 – Caractéristiques de la puissance en fonction de la vitesse.

les éoliennes de petite puissance doit être simple et économique tout en maintenant l'efficacité. Il existe deux catégories principales de stratégies MPPT : celles qui nécessitent la connaissance préalable de la caractéristique $Cp(\lambda)$de l'éolienne, et celles qui n'en ont pas besoin.

3.3.1 La commande en couple :[7]

Le système éolien proposé dans cette thèse est formé par un émulateur du vent , une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), un redresseur à diodes, et un hacheur de type boost. Un contrôleur MPPT est mis en œuvre pour maximiser la puissance de sortie de l'éolienne en ajustant le rapport cyclique du convertisseur boost, comme le montre la figure 3.3 :

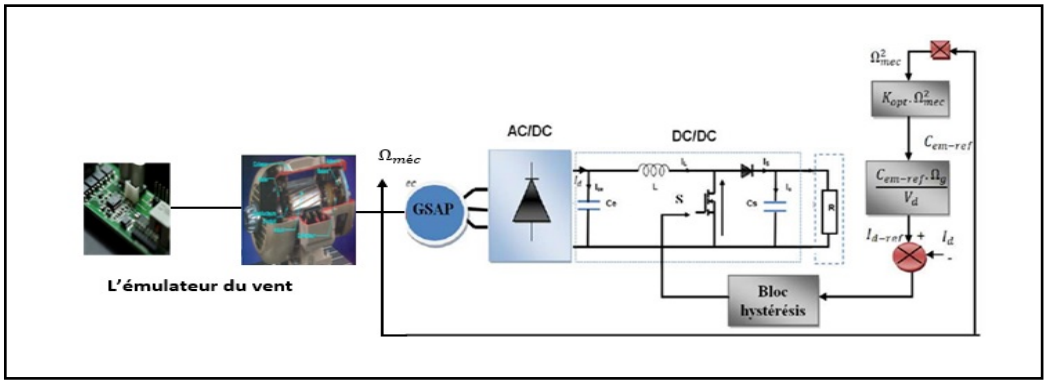


FIGURE 3.3 – Structure de contrôle d'une éolienne

Cette structure de contrôle repose sur l'hypothèse que, en régime permanent, nous pouvons négliger la variation de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de l'émulateur donc on trouve que : [1]

$$\boxed{J\frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} = C_{em} - C_r - C_g = 0} \tag{3.1}$$

En négligeant l'effet du couple résistant dû aux frottements visqueux C_r =0 nous obtenons :

$$\boxed{C_{méc} = C_{em} - C_g = 0} \quad \boxed{C_{em} = C_g} \tag{3.2}$$

Et nous avons :

$$\boxed{G = \frac{C_{aéro}}{C_g}} \quad \boxed{C_g = \frac{C_{aéro}}{G}} \tag{3.3}$$

Notons que G=1, donc l'équation devient :

$$\boxed{C_{aéro} = C_{em}} \tag{3.4}$$

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

$$\boxed{C_{em-réf} = C_{aéro-est}} \tag{3.5}$$

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

$$\boxed{C_{aéro-est} = (1/2\rho\Pi R^2 C_p V_{est}^3)\frac{1}{\Omega_{t-ext}}} \tag{3.6}$$

Une estimation de la vitesse de l' émulateur est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\boxed{\Omega_{t-ext} = \frac{\Omega_{méc}}{G}} et \boxed{\Omega_{t-ext} = \Omega_{méc}} \tag{3.7}$$

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

$$\boxed{V_{est} = \frac{\Omega_{t-ext} R}{\lambda}} \tag{3.8}$$

alors nous obtenons :

$$\boxed{C_{em-réf} = (1/2\frac{\rho\Pi R^5 C_p}{\lambda^3})\Omega_{mc}^2} \tag{3.9}$$

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

$$\boxed{C_{cm-réf} = (1/2\frac{\rho\Pi R^5 C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3})\Omega_{mec}^2} \tag{3.10}$$

En posant :

$$\boxed{C_{em-réf} = (1/2\frac{\rho \Pi R^5 C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3})} \tag{3.11}$$

L'expression (3.11) peut s'écrire sous la forme :

$$\boxed{C_{em-réf} = K_{opt}\Omega_{mec}^2} \tag{3.12}$$

La figure (3.1) montre le circuit de contrôle du hacheur boost du système éolien. Le courant de référence $Id_{réf}$ est déterminé à partir du couple $C_{em-réf}$ et la tension redressée V_d. Nous appliquons la formule suivante :

$$\boxed{Id_{réf} = \frac{C_{em-réf}\Omega_g}{Vd}} \tag{3.13}$$

Nous comparons entre le courant redressé réel Id et le courant de référence$Id_{réf}$, l'erreur produite par cette comparaison est envoyé dans un bloc hystérésis pour obtenir le signal de commutation (la fermeture et l'ouverture) de l'interrupteur du hacheur survolteur .

3.4 Simulation de la chaine de conversion éolienne :

Dans cette étude, la chaîne de conversion éolienne développée est constituée par :

⇒ Un émulateur du vent

⇒ Une géneratrice synchrone à aimant permanent (GSAP)

⇒ Un redresseur à diodes

⇒Un hacheur du type survolteur commandé par un bloc MPPT pour extraire le maximum de puissance quel que soit la vitesse du vent

la simulation de cette chaine est réalisée dans un logiciel Matlab/Simulink et répresentée dans la figure (3.3), Les paramètres utilisés sont résumés dans l'annexe.

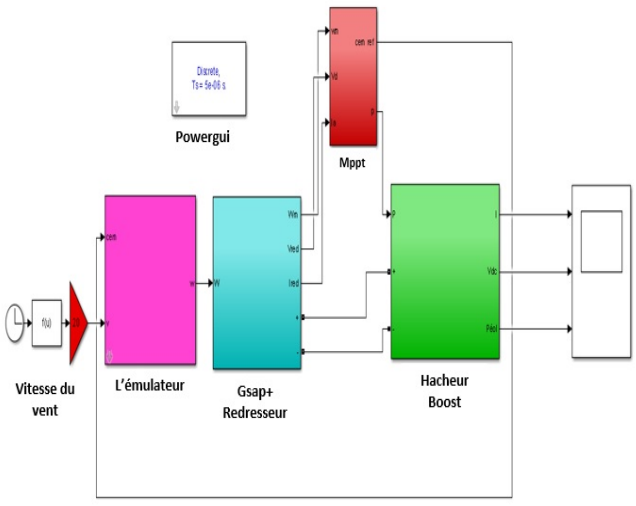


FIGURE 3.4 – Schéma bloc global de la chaine éolienne dans Matlab.

Le sous bloc qui représente l'émulateur du vent est donné par la figure (3.4)

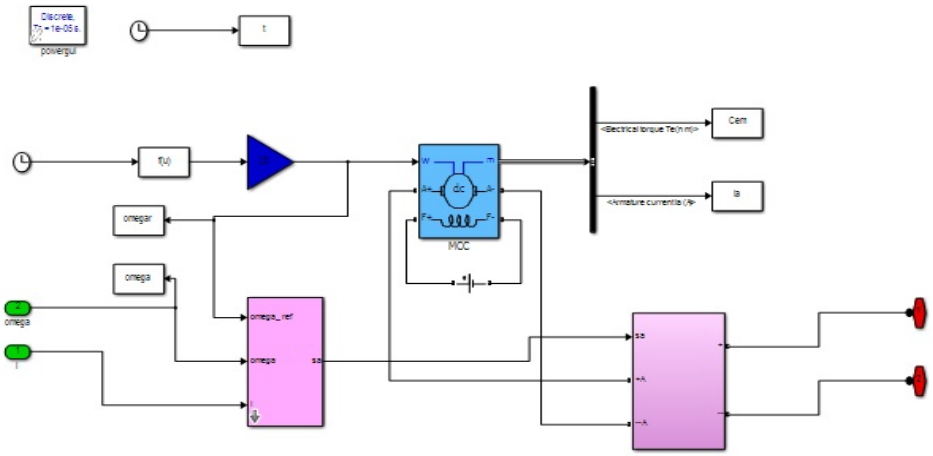


FIGURE 3.5 – Bloc de simulation de l'émulateur dans Matlab.

Pour évaluer l'efficacité de la commande MPPT appliquée à la chaîne éolienne, nous avons utilisé un profil de vent spécifique fourni par la figure 3.4 sur l'émulateur. Les graphiques ci-dessous illustrent respectivement la puissance du système éolien ($P_{éol}$), le couple électromagnétique (C_{em}), la vitesse de rotation, le courant redressé, les courants Iabc et les tensions Vabc de la GSAP.

3.5 Les Résultats de Simulation de la chaine de conversion éolienne :

Les figures suivantes répresentant les résultats de simulation ,ils ont montrent bien l'adaptation du vitesse de rotation avec sa réference ,le couple électromagnétique et la puissance avec les varations de la vitesse de vent.

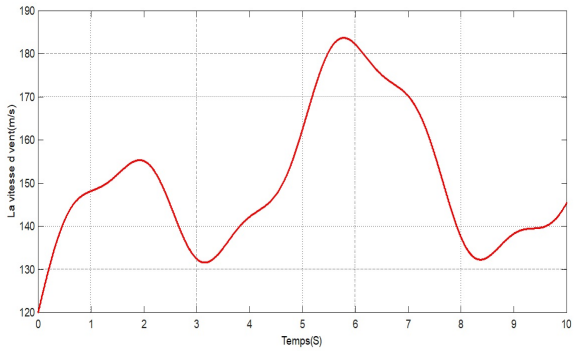


FIGURE 3.6 – Le Profil de vent appliqué.

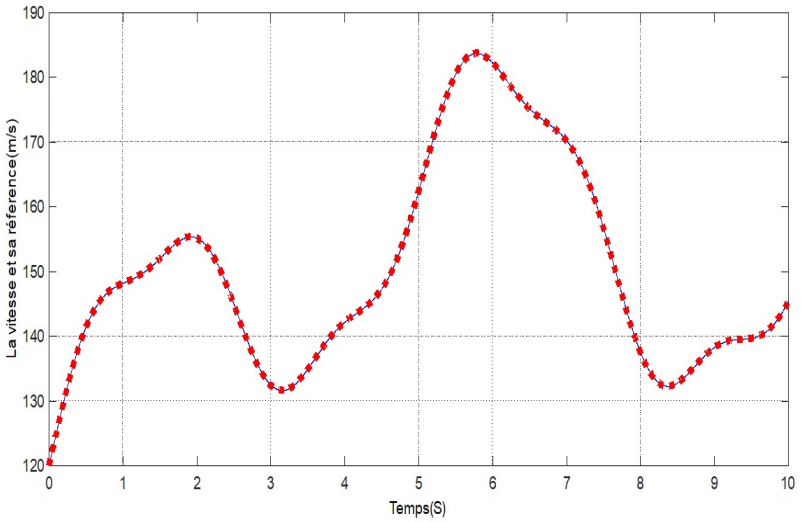


FIGURE 3.7 – La vitesse de vent et sa réference.

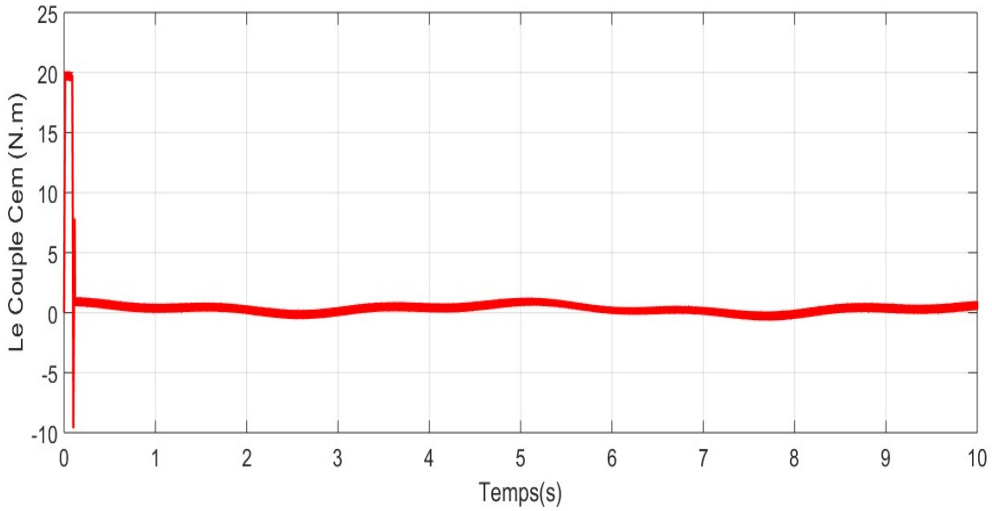


FIGURE 3.8 – Le couple électromagnétique de l'émulateur.

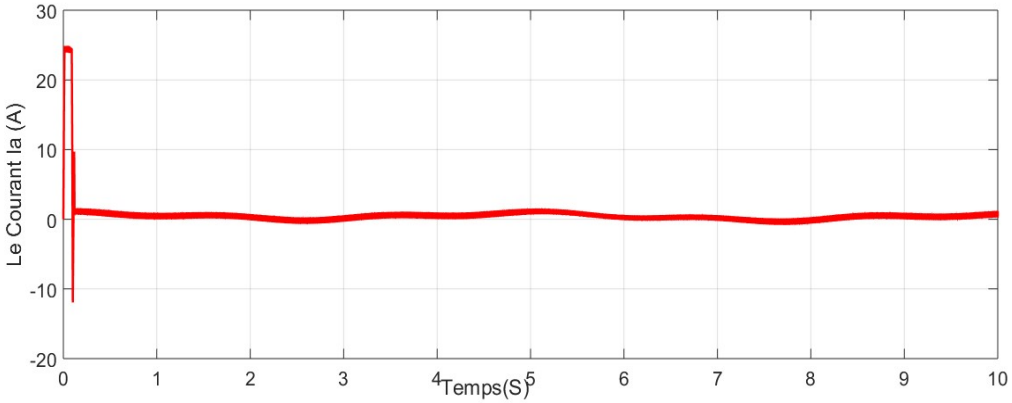


FIGURE 3.9 – Le courant d'armature.

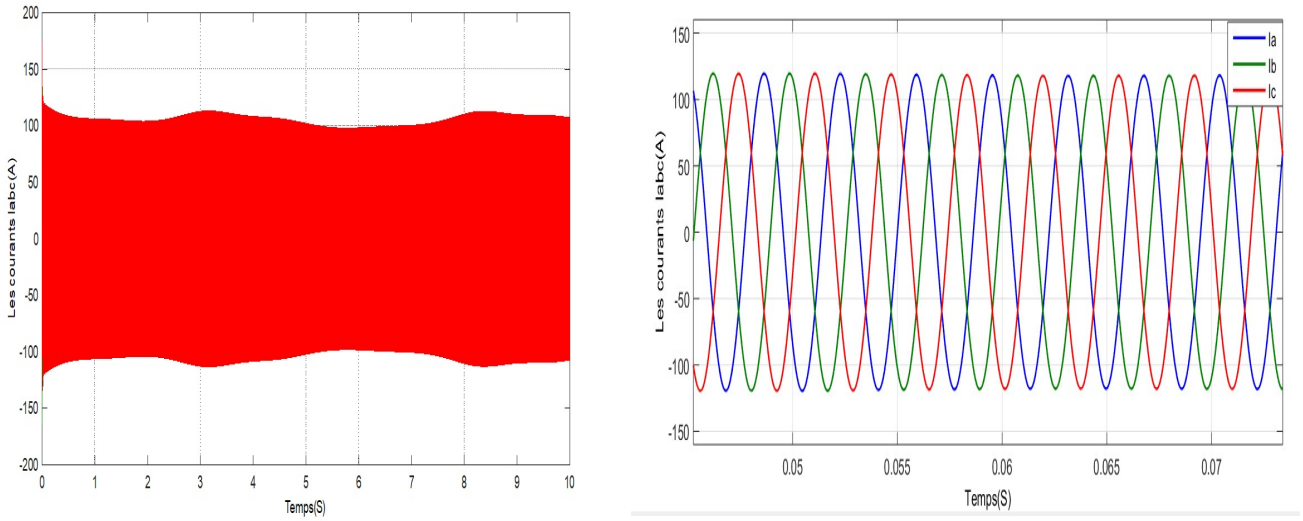


FIGURE 3.10 – Les courants Iabc de la Gsap.

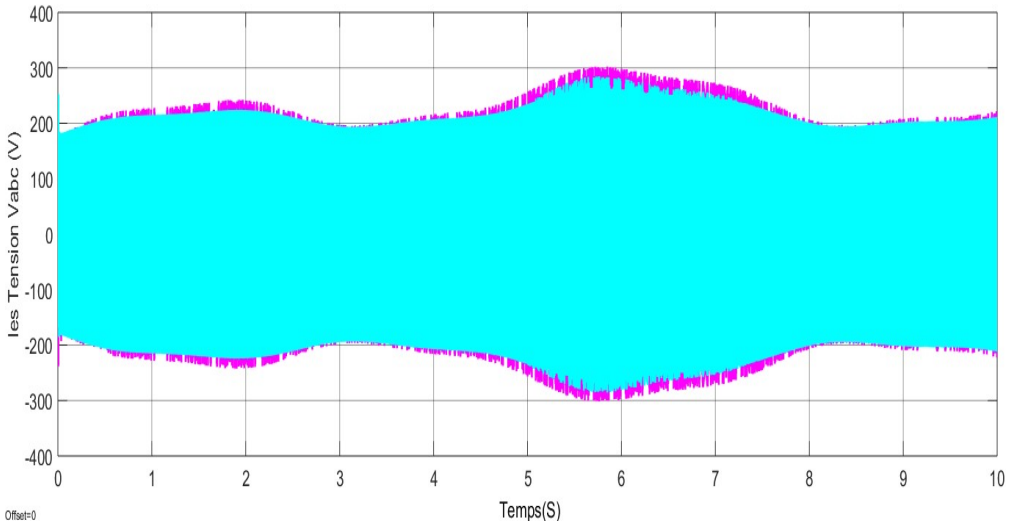


FIGURE 3.11 – les tensions Vabc de la Gsap.

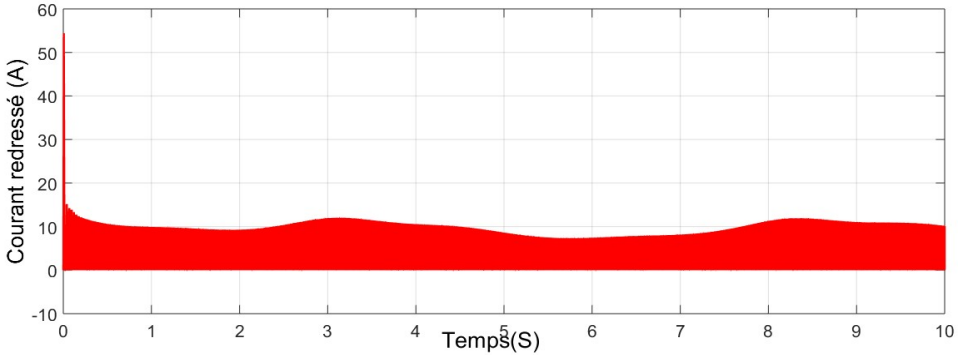


FIGURE 3.12 – Le courant redressé.

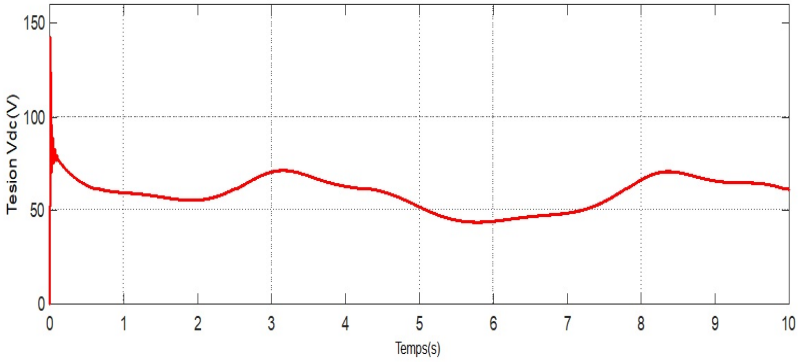


FIGURE 3.13 – La tension Vdc.

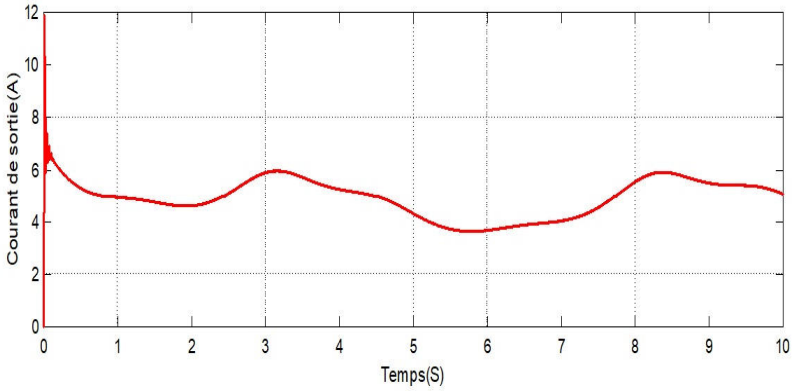


FIGURE 3.14 – Le courant Idc .

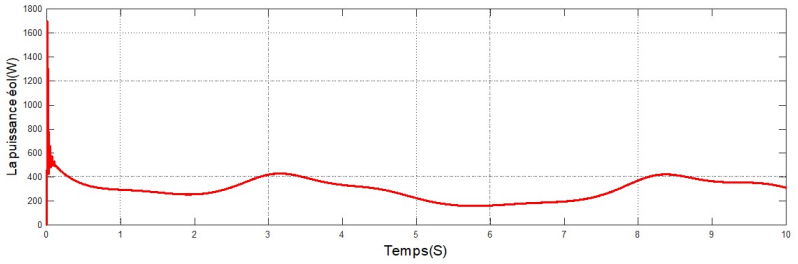


FIGURE 3.15 – La puissance Péol.

3.6 Commande de la chaine de conversion photovoltaïque :

Le GPV est caractérisé par un faible rendement énergétique pendant les périodes d'irradiation faible ou partiellement ombragées. En effet, la quantité de l'énergie électrique générée change continuellement avec les conditions météorologiques,Cette situation pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur)contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Un contrôleur MPPT est mis en œuvre pour maximiser la puissance à la sortie du système PV, en ajustant le rapport cyclique du convertisseur statique, comme le montre la figure 3.16.

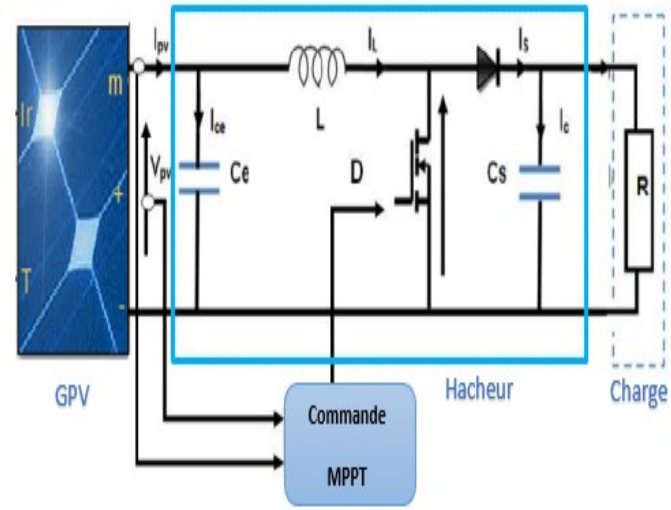


FIGURE 3.16 – Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT.

La littérature est riche par diverses techniques MPPT, tels que Perturbation et Observation ($P\&O$),Cette méthode varient selon leur principe de fonctionnement, leur précision ainsi que leur rapidité de recherche. Pour optimiser l'énergie du système PV, cette algorithmes MPPT sont développés et exploités dans le présent travail, à savoir Perturbation et Observation [49][7].

3.6.1 Méthode de perturbation et d'observation ($P\&O$) :

L'algorithme $P\&O$ est le plus utilisé dans les systèmes PV en raison de sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Comme son nom l'indique, la méthode $P\&O$ est basée sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement de module PV avec un pas fixe où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis en observant son effet sur la puissance de sortie du module [7]. Comme l'illustre la figure 3.17.on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv}, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système à dépassé le PPM [50].

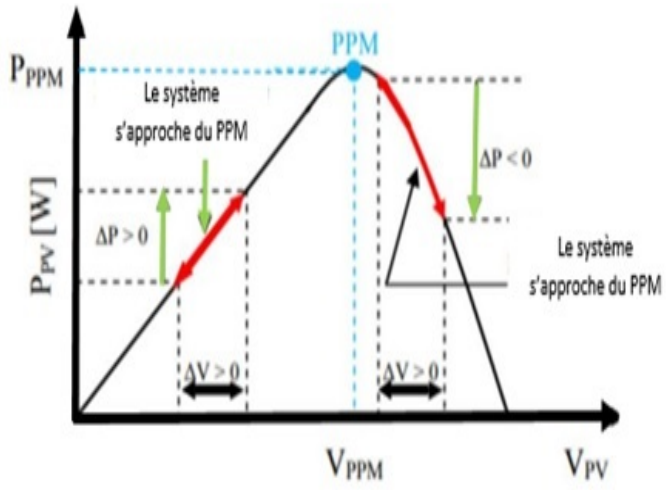


FIGURE 3.17 – Principe de la MPPT avec la méthode *P&O*

L'inconvénient de la technique de *P&O* est que, à l'état stable (équilibre) le point de fonctionnement oscille autour du MPP, causant la perte d'une certaine quantité d'énergie disponible. En plus de cela, dans le cas d'une soudaine augmentation de l'irradiation, l'algorithme *P&O* réagit comme si l'augmentation est produite par l'effet de la perturbation précédente, alors il continue dans la même direction, qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale [1].

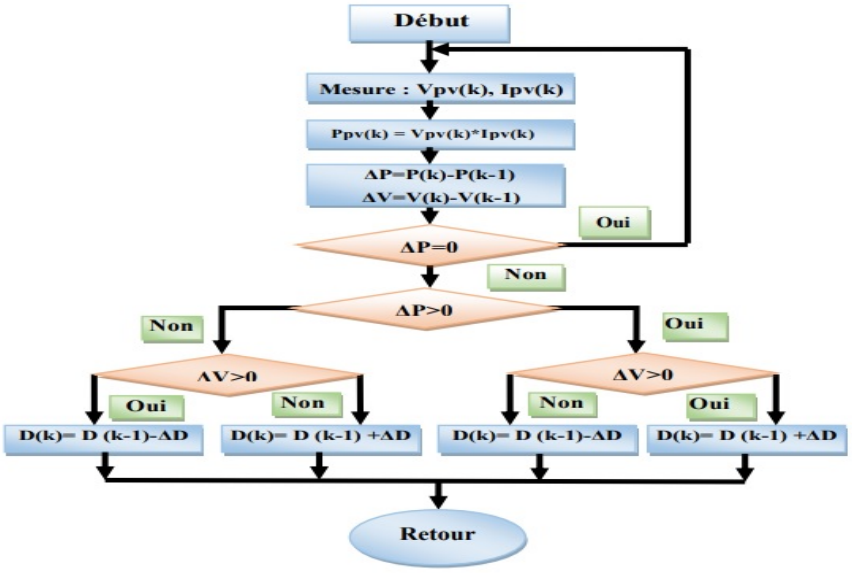


FIGURE 3.18 – Organigramme de la méthode perturbation et observation (*P&O*)

La figure 3.18, représente l'algorithme classique d'une commande de type *P&O*, où deux capteurs sont utilisés pour la mesure du courant et de la tension des panneaux PV, dans le but de déterminer la puissance du PV à chaque instant.

3.7 Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque :

Dans le cadre de ce travail, la chaîne de conversion PV développée, est constituée par deux éléments principaux :

⇒ Un GPV composé de 1 modules connectés en série et 4 modules connectés en parallèle pour fournir à la sortie une puissance de 100 (kW). Le module PV comporte 54 cellules connectées en série pour offrir une puissance de 200 (W).

⇒ Un hacheur du type survolteur commandé par un contrôleur MPPT.

La figure 3.19.représente le schéma global de la chaine PV dans l'environnement Matlab. Les paramètres utilisés sont résumés dans l'annex.

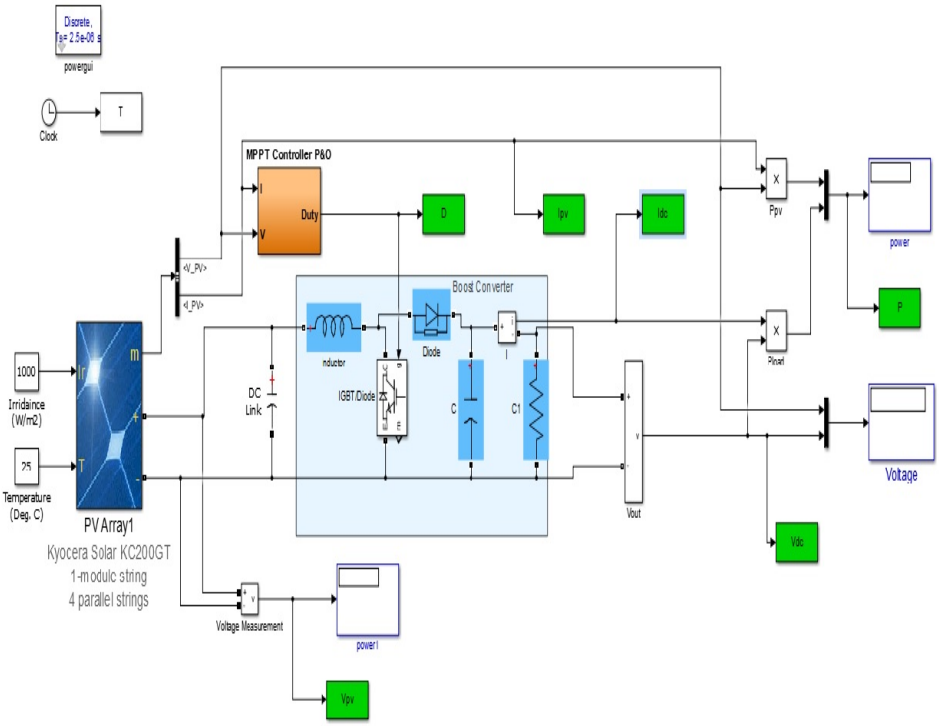


FIGURE 3.19 – Schéma bloc du système photovoltaïque dans l'environnement Matlab

3.8 Les Résultats de Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque :

Les figures suivantes répresentant les résultats de simulation de Génerateur photovoltaique et le hacheur boost respectivement ,ils ont montrent bien l'adaptation de la tension de sortieV_{dc} paraport la tension d'entréeV_{pv} avec un rapport cyclique (D)

cette simulation ils fait dans les condition standards :

⇒ $G = 1000W/m^2$

⇒ $T = 25řC$

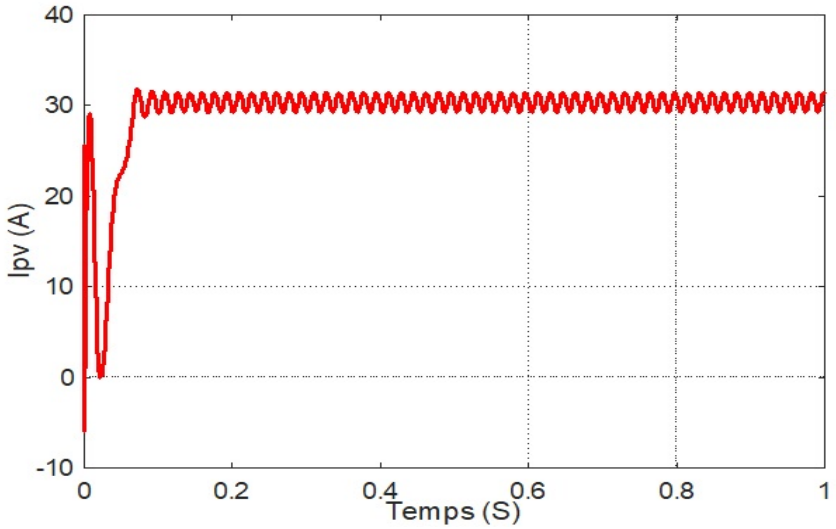


FIGURE 3.20 – Le courant de GPV.

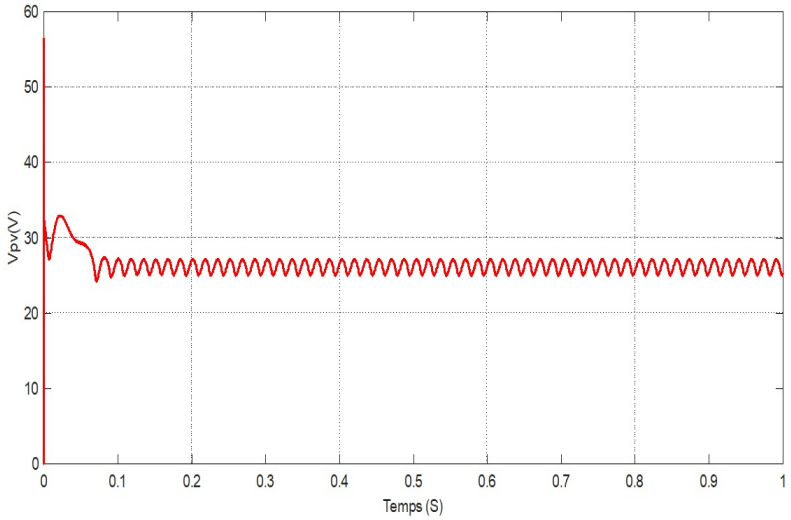


FIGURE 3.21 – La tension de GPV .

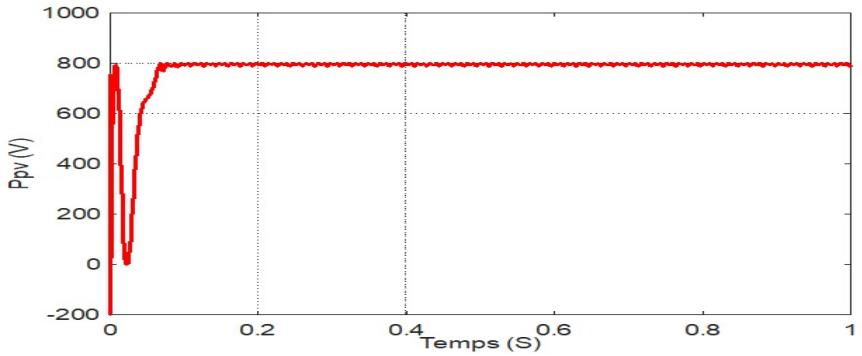


FIGURE 3.22 – La Puissance de GPV

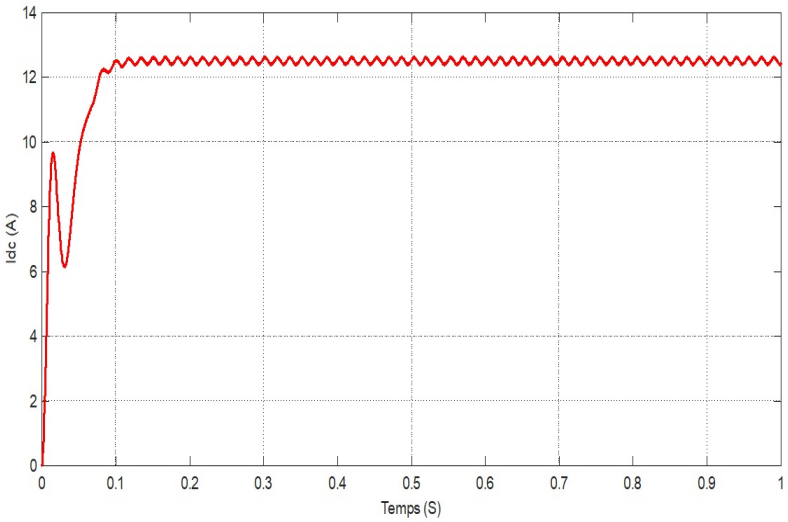


FIGURE 3.23 – Le courant de hacheur

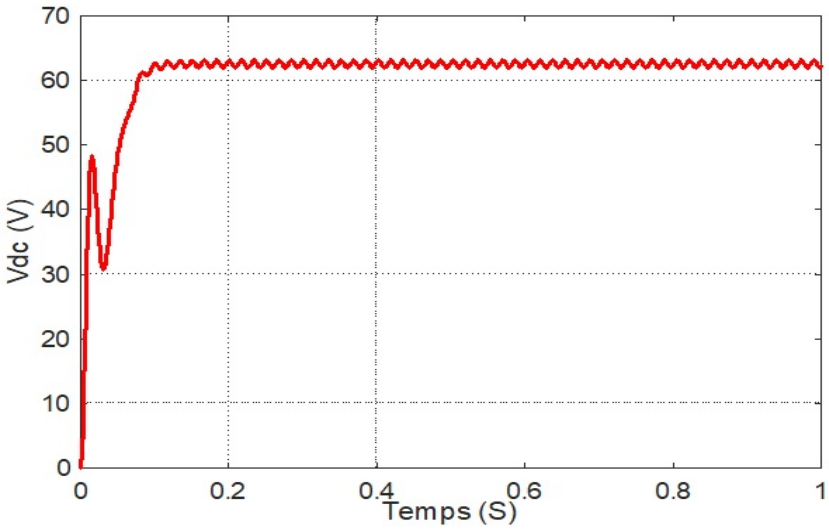


FIGURE 3.24 – La tension de hacheur

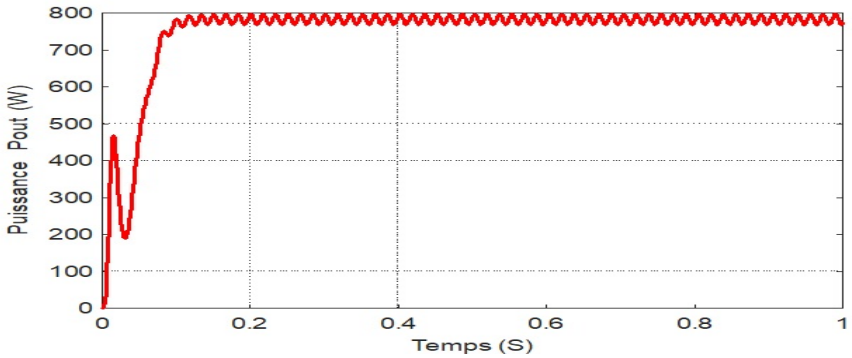


FIGURE 3.25 – La Puissance de hacheur

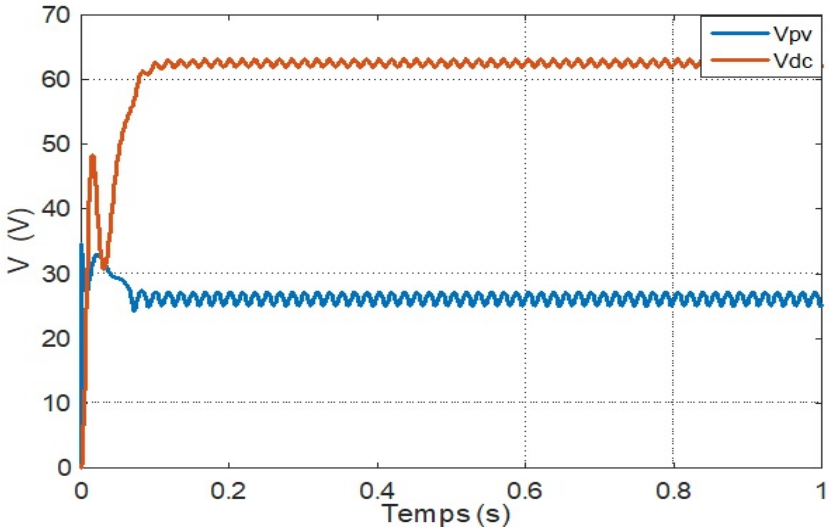


FIGURE 3.26 – La tension de GPV et La tension de hacheur

FIGURE 3.27 – Le rapport cyclique(D)

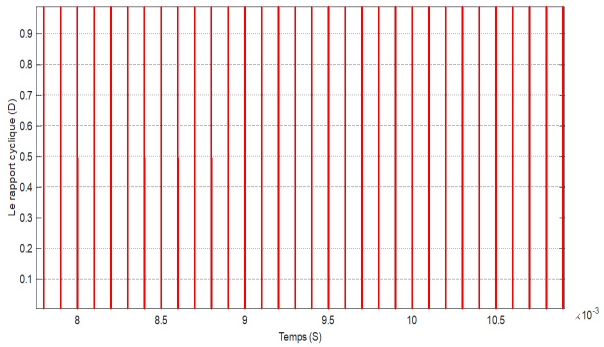


FIGURE 3.28 – Le zome rapport de cyclique(D)

3.9 Le bus continu DC :

Les différentes sources du système sont interconnectées par l'intermédiaire d'un bus DC dont la tension V_{dc} est fixée à 62 (V). Il faut que la tension du bus continu soit supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée côté alternatif de l'onduleur.L'expression de $V_{dc-réf}$ s'écrit :

$$\boxed{\mathrm{V}_{dc-ref} = 2\sqrt{2}V_s} \tag{3.14}$$

Avec Vs : la valeur efficace de la tension de phase à la sortie de l'onduleur

En cas où l'énergie fournie par les sources renouvelables est insuffisante pour satisfaire les exigences de la charge, la tension du bus continu devient inférieure à la valeur de référence. L'énergie manquante est obtenue à partir de la batterie, à condition que l'état de charge de la batterie se trouve dans les limites prédéfinies. Typiquement, l'état de charge (EDC) de la batterie plomb-acide est compris entre 30IJ et 90IJ.Au contraire, quand il existe un excès d'énergie, la tension du bus continu devient

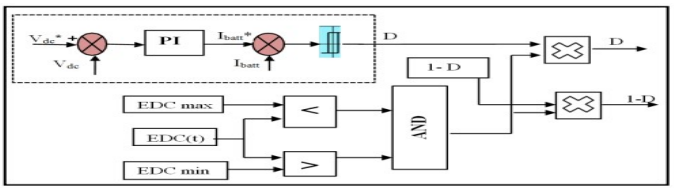


FIGURE 3.29 – Schéma de commande de la tension du bus continu

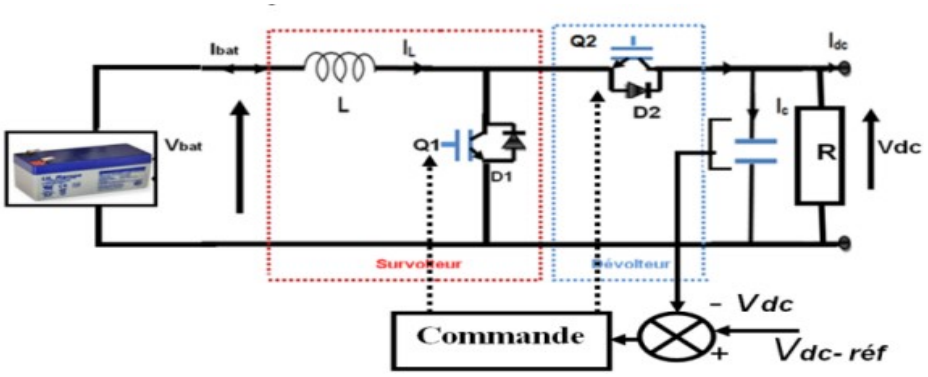


FIGURE 3.30 – Structure de contrôle de l'hacheur réversible en courant

supérieure à la valeur de référence, donc nous chargeons la batterie àpartir de cet excès [7]. La régulation de la tension du bus continu est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant.

La figure 3.29 illustre le principe de la commande en boucle fermée, qui consiste en l'intégration de la boucle de courant en cascade avec la boucle de tension. On voit apparaître explicitement les deux boucles à savoir [39] : Boucle interne rapide : Commande à hystérésis donnée par la boucle du courant qui permet d'assurer la trajectoire du courant en délivrant le rapport cyclique. Boucle externe lente : Boucle de tension contrôlant en PI la tension en sortie du hacheur lors des variations de la charge.

3.10 Stratégies de commande MLI de l'onduleur :

⇒ Principe de fonctionnement :La commande MLI (modulation de largeur d'impulsion)est un signal numérique à période constante mais à rapport cyclique réglable, la tension peut prendre deux valeurs seulement. Dans certains ces très spécifiques(onduleurs à MLI par exemple) on fabrique un troisième niveau en inversant la tension du niveau haut.Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par l'intersection du signal de référence appelé 'modélisation' avec un signal triangulaire de haute fréquence appelé 'porteuse'. Dans le cas de la MLI triphasée la porteuse est commune pour les trois phases et la modulatrice est propre à chaque phase . On définit deux paramètres caractérisant cette commande.

⇒ L'indice de modulation m , égal au rapport fp/fr des fréquences de la porteuse et de la référence.

⇒Le coefficient de réglage en tension r, égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à valeur crête de l'onde de modulation.

⇒La modulation est dite synchrone si fp est multiple entier de fr , elle est asynchrone dans le

cas contraire. Si le rapport des fréquences fp à fr est multiple de trois signaux de commande pour les trois phases seront les mêmes mais décalés d'un tiers de période .

⇒La commande MLI est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïdale.

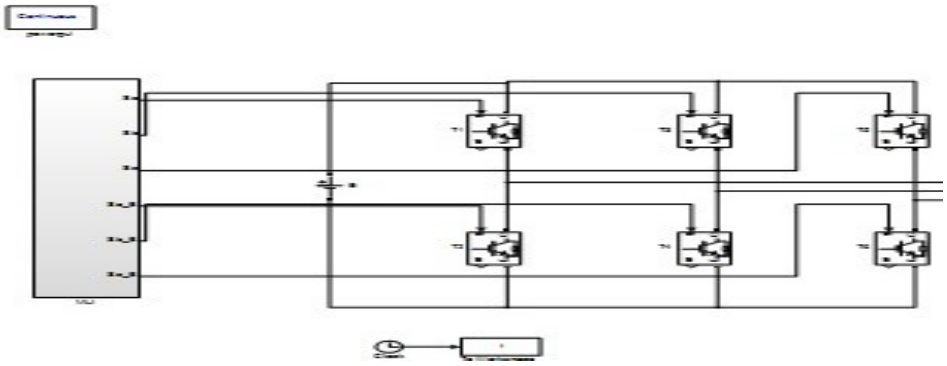


FIGURE 3.31 – Simulation d'un onduleur triphasé commande MLI.

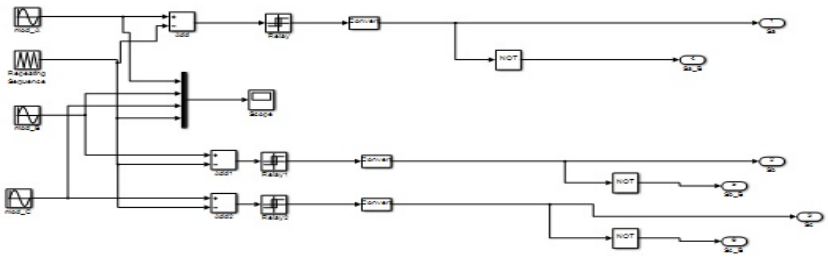


FIGURE 3.32 – La commande MLI.

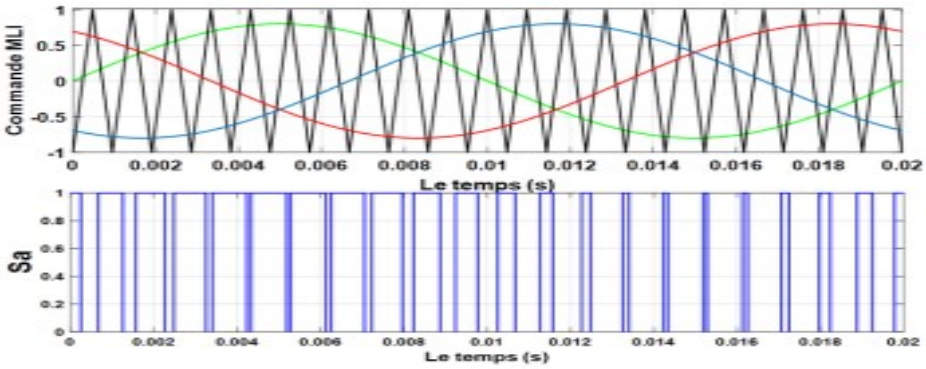


FIGURE 3.33 – La commande MLI.

3.11 Conclusion :

Dans ce chapitre,on a exposé le contrôle et Les Résultats de Simulation des différents composants du système hybride autonome. Tout d'abord nous avons mis en évidence l'utilisation d'algorithmes MPPT pour optimiser l'efficacité des sources d'énergie renouvelable photovoltaïque et éolien.

on appliquée dans :

⇒la chaine éolienne la commande MPPT dans émulateur du vent etla commande de couple.

⇒ la chaine photovoltaïqueon la commande MPPTdansconvertisseur DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale Pour optimiser l'énergie produite par le système PV.

Chapitre 4

Gestion et simulation du SEH appliquée au charge

Sommaire

4.1 Introduction : **80**
4.2 Différentes modes de fonctionnement du système hybride : **80**
4.2.1 Différents scénarios de fonctionnement du SEH : 82
4.2.1.1 Scénarios de fonctionnement pendant un jour ensoleillé ou nuageux 83
4.2.1.2 Scénarios de fonctionnement pendant la nuit 83
4.2.2 Système de supervision du SEH : 84
4.2.3 Stratégie de gestion à base de règles floues : 86
4.2.3.1 Mise en œuvre du système flou : 86
4.2.3.2 Choix des fonctions d'appartenance : 87
4.2.3.3 Choix des règles d'inférences : 87
4.3 Interprétation des résultats obtenus par la simulation : **88**
4.4 Conclusions **90**

4.1 Introduction :

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter une stratégie optimale de gestion de l'énergie pour alimenter une charge en utilisant différents éléments d'un système d'énergie hybride, tels que le photovoltaïque, l'éolien et la batterie.

La stratégie de gestion proposée repose principalement sur les connaissances de l'expert qui a conçu les règles.

En se basant sur les sources d'énergie disponibles, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie pendant 24 heures, plusieurs scénarios de gestion peuvent être proposés afin d'assurer le bon fonctionnement de l'algorithme.

Pour ce faire, nous avons utilisé Matlab/Simulink, qui permet de déterminer en temps réel le fonctionnement des différents éléments constituant le système d'énergie hybride.

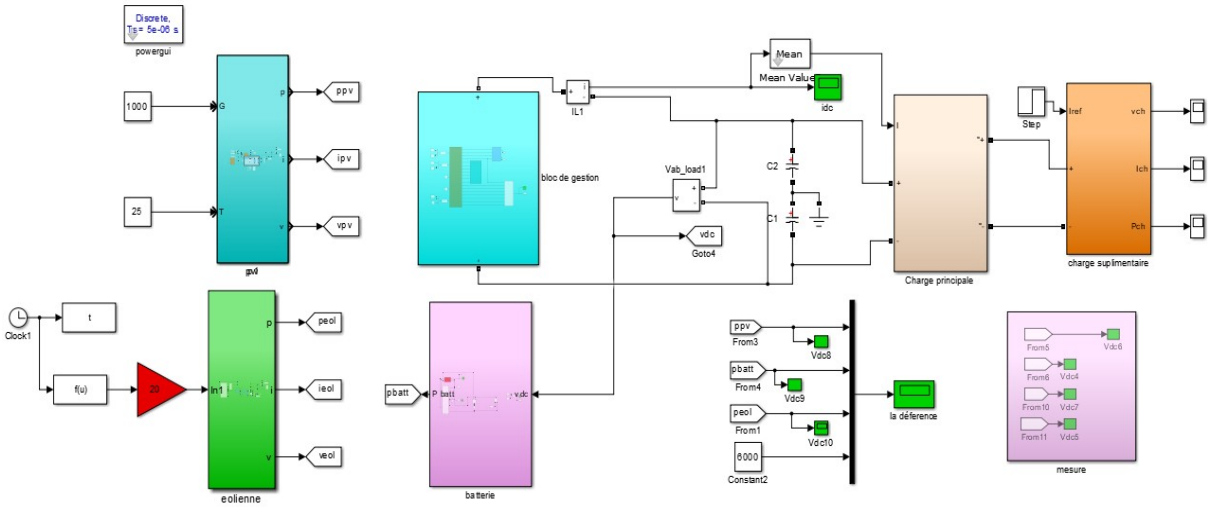


FIGURE 4.1 – Schéma du système global sous Matlab/Simulink.

4.2 Différentes modes de fonctionnement du système hybride :

Notre configuration comprend un générateur photovoltaïque (GPV) d'une capacité de 800(W), une éolienne d'une puissance nominale de 1600(W)et une batterie de 65 Ah et 24 V. Le système d'énergie hybride (SEH) a été conçu pour alimenter une charge principale en courant continu (DC) ainsi que des charges supplémentaires en courant alternatif (AC). Les paramètres suivants sont pris en compte :

⇒ Les sources principales du système sont le photovoltaïque (PV) et l'éolien.

⇒ La batterie est utilisée pour compenser les déficits de production en fournissant de l'énergie supplémentaire, et elle peut également être utilisée pour stocker l'excédent d'énergie en cas de surproduction.

⇒ La charge principale en courant continu (DC) reste toujours connectée.

⇒ les charges supplémentaires sont utilisées pour absorber l'excédent de production lorsque la batterie est entièrement chargée.

Pour simplifier l'étude, nous faisons l'hypothèse que chaque composant a deux états possibles : actif ou inactif.

Par exemple, pendant une journée d'été, le rayonnement solaire est plus fort pendant la journée, tandis que le vent peut souffler la nuit. la figure (4.1) indique l'état de chaque composant du système d'énergie hybride (SEH), en fonction des sources d'énergie disponibles, de la consommation d'énergie et de l'état de charge de la batterie.Nous distinguons plusieurs scénarios de fonctionnement du système hybride. Tous ces scénarios sont disponibles dans la figures 4.2 et les figures si décceus .

Etat		Actif	Inactif
Sources Principales	PV	• Pendant un jour ensoleillé.	• Pendant la nuit • Pendant un jour nuageux • En cas de panne.
	Eolien	• Pendant la nuit. • Pendant un jour nuageux.	• En cas de Vitesse du vent < à la Vitesse de démarrage de l'éolien. • En cas de panne. • En cas de Vitesse du vent > à la Vitesse d'arrêt de l'éolien.
Sources auxiliaire	Batterie	• Pendant l'incapacité des sources principales, par exemple lorsque 1. Les conditions climatiques sont faibles 2. La demande de la charge est supérieure à la production 3. En cas de panne d'une source oules deux sources principales 4. Lorsque l'état de charge est supérieur à 30 %.	• La demande de la charge égale ou inférieure à la production (P_{ch} = <P_{pv}+P_{eol}).
Charge Principale	DC	La charge est toujours connectée.	
Charge auxiliaire	Batterie	En cas où existe un excès d'énergie, Avec EDC est inférieur à seuil haut.	Lorsqu'EDC est supérieur à seuil haut (EDC_{max}= 0.9).
	DC ou AC	En cas où existe un excès d'énergie etEDC est supérieur à seuil haut.	En cas de manque d'énergie et EDC est inférieur à seuil haut.

FIGURE 4.2 – L'état de chaque composant constituant le SEH.

4.2.1 Différents scénarios de fonctionnement du SEH :[11]

4.2.1.1 Scénarios de fonctionnement pendant un jour ensoleillé ou nuageux

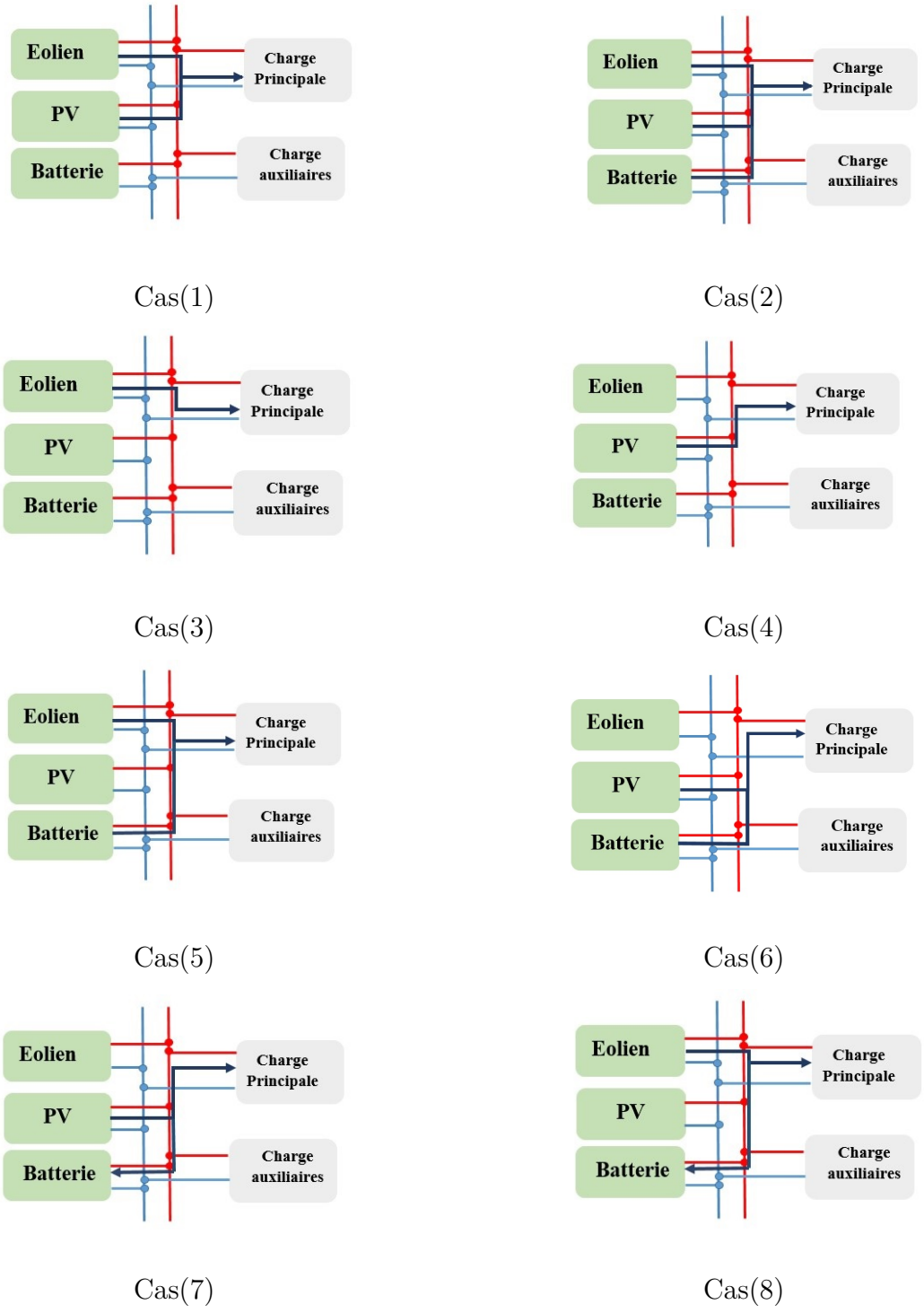


FIGURE 4.3 – Scénarios de fonctionnement d'SEH pendant un jour ensoleillé ou nuageux.

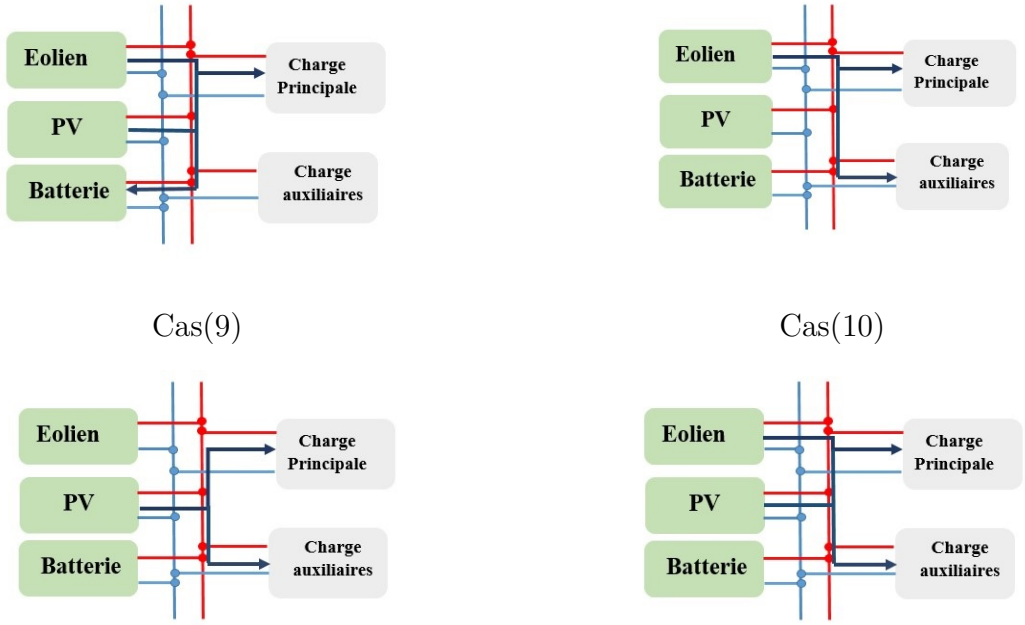


FIGURE 4.4 – Scénarios de fonctionnement d'SEH pendant un jour ensoleillé ou nuageux.

4.2.1.2 Scénarios de fonctionnement pendant la nuit

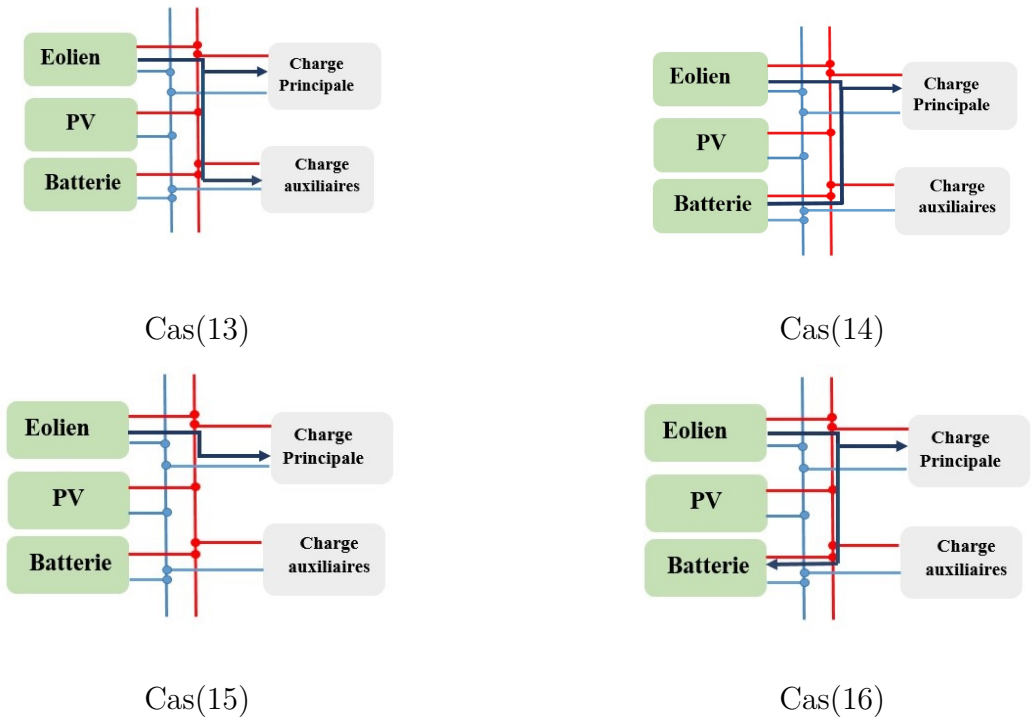


FIGURE 4.5 – Scénarios de fonctionnement du système hybride.

4.2.2 Système de supervision du SEH :[11]

Nous avons suggéré deux approches de gestion différentes. La première consiste à utiliser le système de conversion éolien comme source principale d'alimentation de la charge lorsque la puissance éolienne est supérieure ou égale à la puissance photovoltaïque. En revanche, la deuxième approche privilégie le système de conversion photovoltaïque comme source principale pour alimenter la charge.

Dans les deux stratégies, lorsque l'un des systèmes de conversion (éolien ou photovoltaïque) est considéré comme la source principale, l'autre système agira en tant que source de secours et sera activé dès que le premier système ne peut pas répondre à la demande de la charge.

Nous utilisons également la batterie dans deux rôles. En cas de production insuffisante, elle est utilisée comme source d'énergie pour compenser le déficit. En cas de surproduction, la batterie joue le rôle de système de stockage pour stocker l'excédent d'énergie.

Étant donné que le système hybride est isolé, nous avons inclus une charge dissipative qui sert de "débordement" pour absorber les éventuels excédents de production, représentés par la puissance supplémentaire (P_{sup}).

Le fonctionnement de ces deux approches de gestion est décrit par deux algorithmes représentés dans les organigrammes de figure (4.6), et détaillé dans le tableau (4.7).

⇒ Les Equations illustrant la gestion de puissance :

$$\Delta P_0 = P_{éol} - P_{pv} \quad (4.1)$$

$$\Delta P_1 = P_{éol} - P_{ch} \quad (4.2)$$

$$\Delta P_2 = P_{pv} - P_{ch} \quad (4.3)$$

$$\Delta P_3 = P_{hyb} - P_{ch} \quad (4.4)$$

Avec :

$P_{éol}$: la puissance éolienne.

P_{pv} : la puissance photovoltaïque.

P_{ch} : la puissance de charge.

P_{hybr} : la somme des puissances éolienne et photovoltaïque.

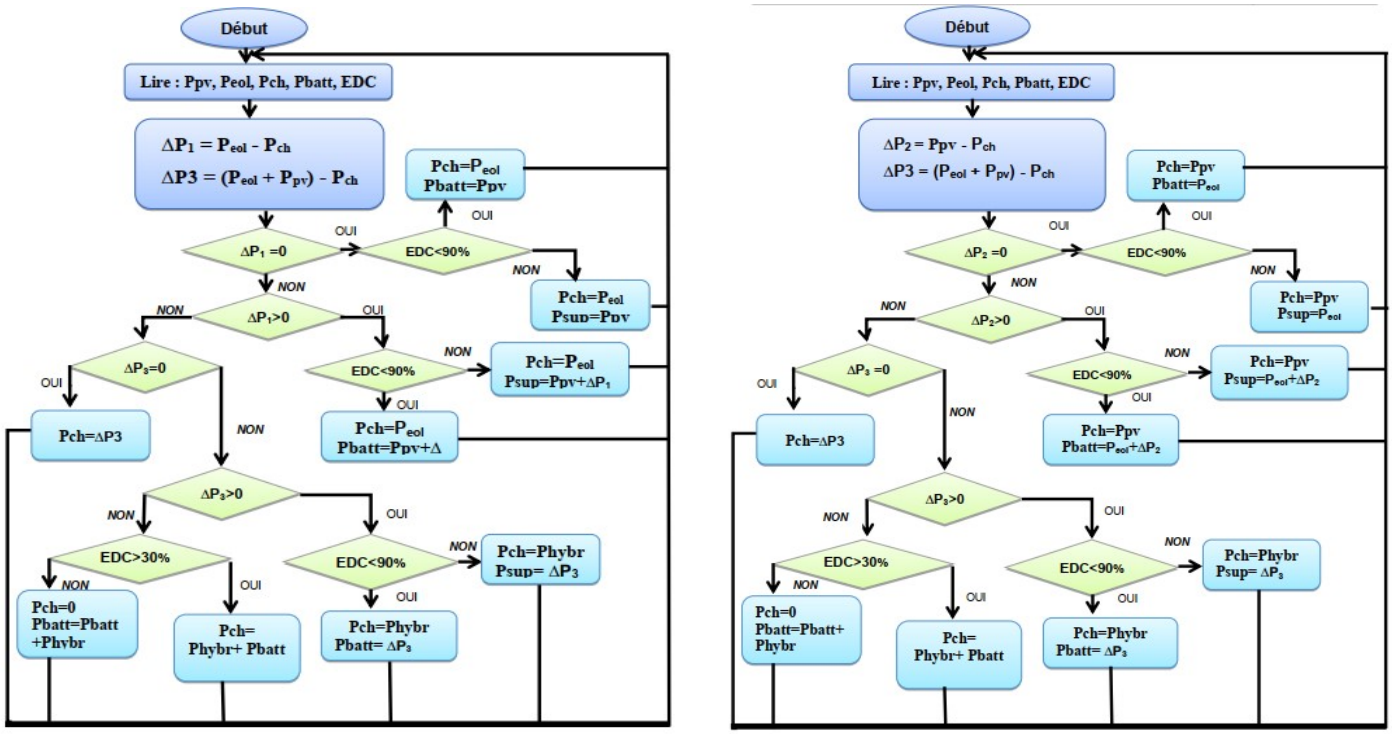


FIGURE 4.6 – Organigramme de gestion qui considère le système de conversion éolien et photovoltaïque.

Mode	P charge	P batterie	SOC	P supplementire
1	Peol	Charge Pbatt = Pbatt+ Ppv	SOC<0.9	0
2	Peol	Repos	SOC>=0.9	Ppv
3	Peol	ChargePbatt =Pbatt+ΔP1+Ppv	SOC<0.9	0
4	Peol	Repos	SOC>=0.9	ΔP1+Ppv
5	Phybr	Repos		0
6	Phybr	Charge Pbatt = Pbatt +ΔP3	SOC<0.9	0
7	Phybr	Repos	SOC>=0.9	ΔP3
8	0	Charge Pbatt = Pbatt +Phybr	SOC<=0.3	0
9	Phybr+Pbatt	discharge	SOC>0.3	0
10	Ppv	Charge Pbatt = Pbatt+ Peol	SOC<0.9	0
11	Ppv	Repos	SOC>=0.9	Peol
12	Ppv	Charge Pbatt=Pbatt+ΔP2+Peol	SOC<0.9	0
13	Ppv	Repos	SOC>=0.9	ΔP2+Peol
14	Phybr	Repos		0
15	Phybr	Charge Pbatt = Pbatt +ΔP3	SOC<0.9	0
16	Phybr	Repos	SOC>=0.9	ΔP3
17	0	Charge Pbatt = Pbatt +Phybr	SOC<=0.3	0
18	Phybr+Pbatt	discharge	SOC>0.3	0

FIGURE 4.7 – Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion.

Mode	Pch
Mode 1	Peol
Mode 2	Ppv
Mode 3	Ppv+Peol
Mode 4	Ppv+Peol+Pbatt

FIGURE 4.8 – Différents modes d'alimentation de la charge principale.

En ce qui concerne les différents modes (1, 2 et 3), en cas de surplus de puissance, il est possible de recourir à des moyens de stockage tels que les batteries pour conserver ce surplus et l'utiliser ultérieurement. Alternativement, ce surplus peut être directement attribué à des charges dérivées, si elles sont présentes. En ce qui concerne le quatrième mode, si la puissance générée n'est pas suffisante pour alimenter notre charge, il est possible d'ajouter une batterie à condition que son niveau de charge soit supérieur au niveau minimum requis. Dans le cas contraire, il est toujours possible d'alimenter les charges supplémentaires.

4.2.3 Stratégie de gestion à base de règles floues :[11]

La figure IV.4 illustre le système de supervision à base de la logique floue qui assure la gestion des flux de puissances entre les différentes parties.

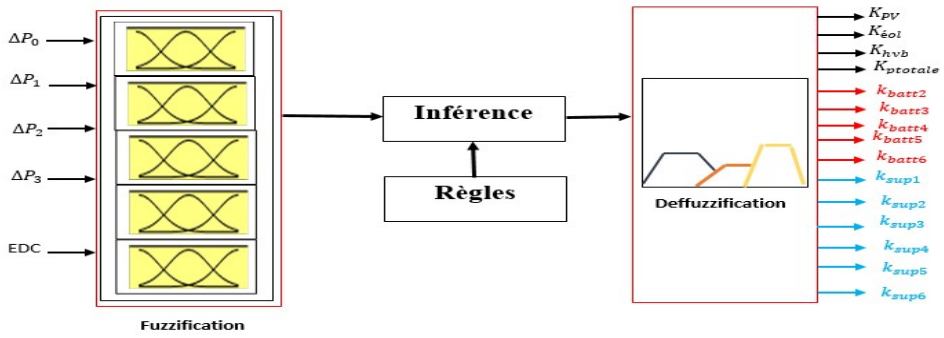


FIGURE 4.9 – Système de supervision à base de la logique floue.

4.2.3.1 Mise en œuvre du système flou :[11]

Le contrôleur flou adopté pour la gestion de l'énergie utilise cinq variables d'entrées qui sont :

P_0, P_1, P_2, P_3 et l'état de charge EDC. Les variables de sortie du système étant les signaux de commande des interrupteurs :

$\Rightarrow K_{pv}$: interrupteur alimenté la charge par la puissance P_{pv}seulement.

$\Rightarrow K_{éol}$: interrupteur alimenté la charge parla puissance $P_{éol}$seulement.

$\Rightarrow K_{hybr}$: interrupteur alimenté la charge parla puissance P_{hybr}.

$\Rightarrow K_{ptotale}$: interrupteur alimenté la charge parla puissance $(P_{hybr} + P_{batt})$.

$\Rightarrow K_{batt1}$: interrupteur charge la batterie par la puissance P_{pv}.

$\Rightarrow K_{batt2}$: interrupteur charge la batterie par la puissance $P_{éol}$.

$\Rightarrow K_{batt3}$: interrupteur charge la batterie par la puissance P_{hybr}.

$\Rightarrow K_{batt4}$: interrupteur charge la batterie par la puissance $P_{hybr-Pch}$.

$\Rightarrow K_{batt5}$: interrupteur charge la batterie par la puissance P_{pv}-P_{ch}.

$\Rightarrow K_{batt6}$: interrupteur charge la batterie par la puissance $P_{éol}$-P_{ch} .

$\Rightarrow K_{sup1}$: interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance P_{pv}.
$\Rightarrow K_{sup2}$: interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance $P_{éol}$.
$\Rightarrow K_{sup3}$: interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance P_{hybr}.
$\Rightarrow K_{sup4}$: interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance $P_{hybr} - P_{ch}$.
$\Rightarrow K_{sup5}$: interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissanceP_{pv} P_{ch}.
$\Rightarrow K_{sup6}$: interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance $P_{éol} - P_{ch}$.

4.2.3.2 Choix des fonctions d'appartenance :[11]

l'état de charge de la batterie peut être : faible, Moyen ou élevé. De même, la différence de la puissance peut être considérée comme : Négative (NE), Zéro (ZE) ou Positive (PE). Enfin, les états des interrupteurs K de la charge, la batterie ou la charge auxiliaire peuvent être : fermé ou ouvert. Chacun de ces ensembles flous est désigné par une fonction d'appartenance, nous avons choisi des fonctions d'appartenance de type trapézoïdal et triangulaire pour désigner chacun des ensembles flous répartis sur l'univers de discours des variables de notre système. Les fonctions d'appartenance choisies pour les , l'état de charge de la batterie et l'état des interrupteurs (k) sont montrées respectivement dans les figures 4.10, 4.11 , 4.12,et 4.13.

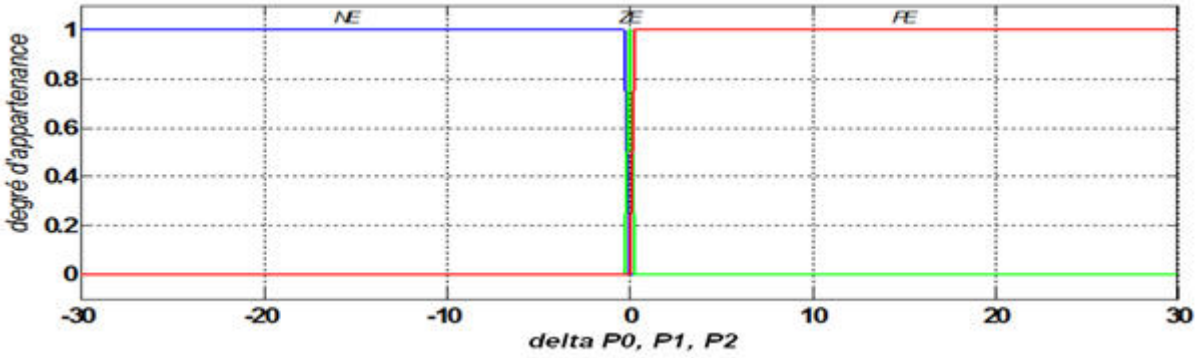


FIGURE 4.10 – Fonctions d'appartenance de delta P0, P1, P2.

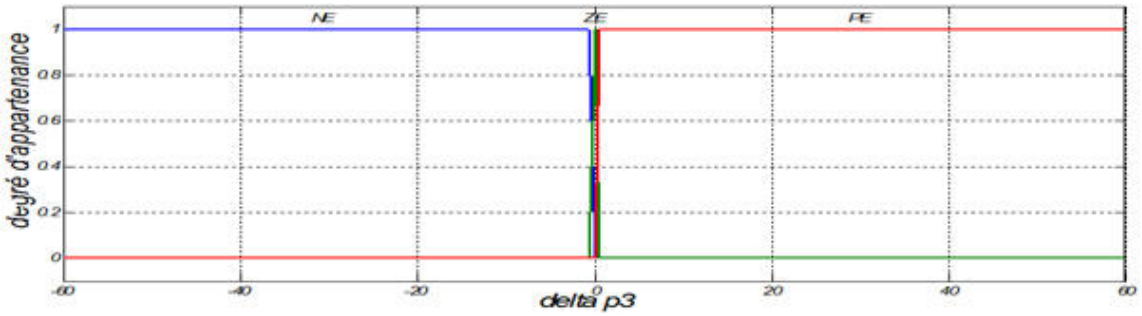


FIGURE 4.11 – Fonctions d'appartenance de delta P3.

4.2.3.3 Choix des règles d'inférences :[11]

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elles lient les variables d'entrées à la variable de sortie linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles. Dans notre système on a utilisé 63 règles d'inférences floues.

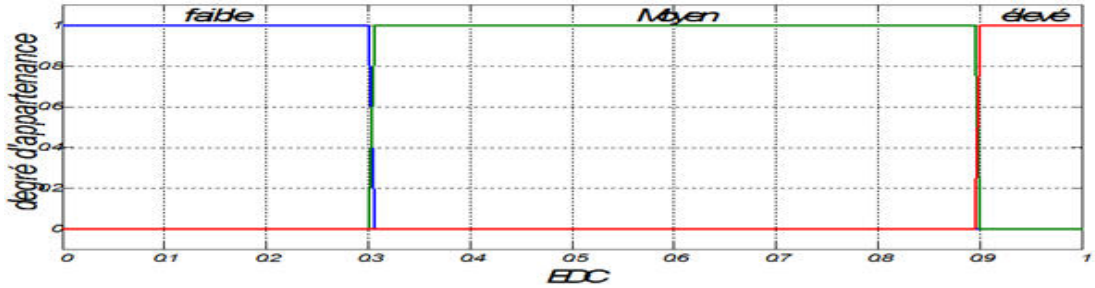


FIGURE 4.12 – Fonctions d'appartenance d'EDC.

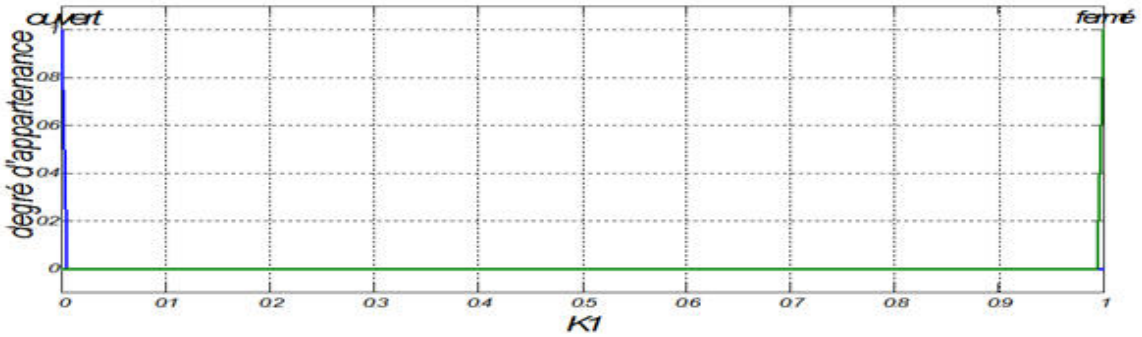


FIGURE 4.13 – Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie.

4.3 Interprétation des résultats obtenus par la simulation :

Le but de ce projet est d'alimenter une charge dans une région isolé, Par un système hybride (photovoltaïque, éolienne plus la batterie). Pour cette raison on a fait une étude horaire sur les conditions climatiques (l'irradiation, la température et la vitesse du vent) pendant la durée d'une année .

On est ensuite on a applique les profile si décceus su notre simulation en fixant le temps de simulation de cette dernière à 24s qui est réellement équivalent à 24h. Les conditions climatiques (l'irradiation, la température et la vitesse du vent) varient de la manière suivante :

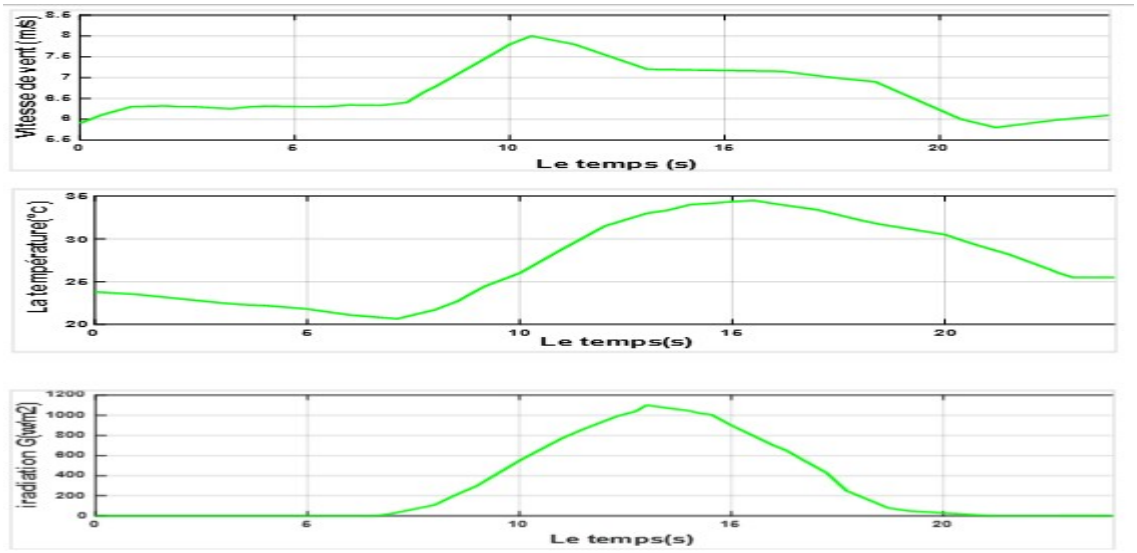


FIGURE 4.14 – Evolution des données d'entrée (irradiation, température et vent).

Puis, nous avons fixé l'état de charge de la batterie à 50

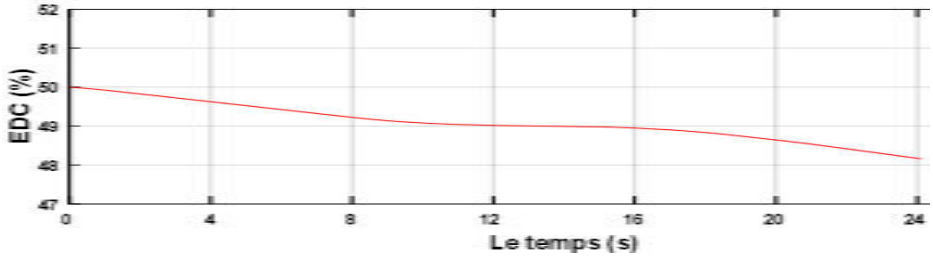


FIGURE 4.15 – Evolution d'EDC.

La figure illustrée ci-dessous représente les deux puissances générées par le générateur éolien et photovoltaïque, la puissance de la batterie ainsi que le profil de charge demandé.

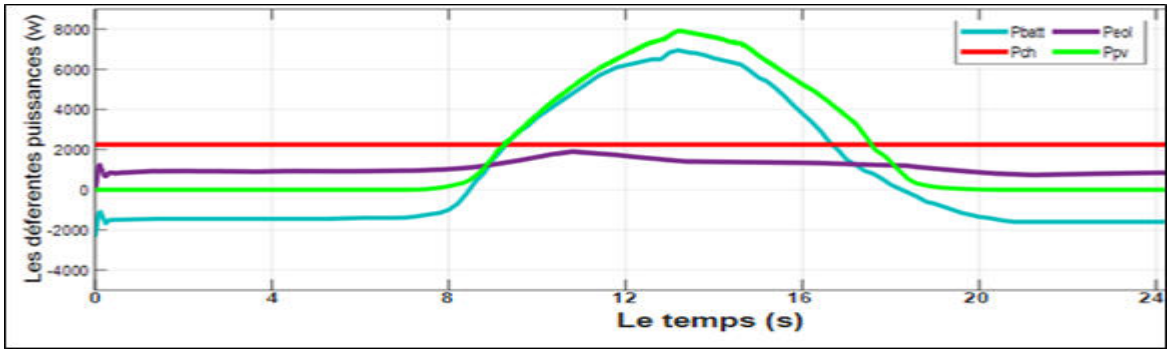


FIGURE 4.16 – Profile de P_{ch}, P_{pv}, P_{eol} et P_{batt}.

⇒ Les figures des différents modes :

Dans ce qui suit, nous allons montrer avec précision l'intervalle de temps des puissances que alimente notre charge ce qui reflète notre gestion appliquer au système.

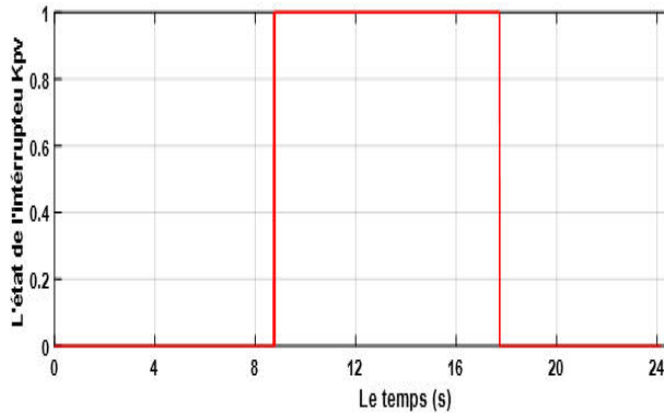


FIGURE 4.17 – L'état d'interrupteur photovoltaïque.

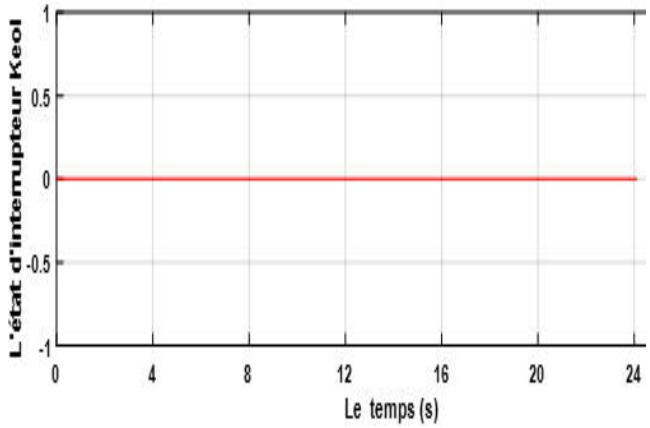


FIGURE 4.18 – L'état d'interrupteur éolien.

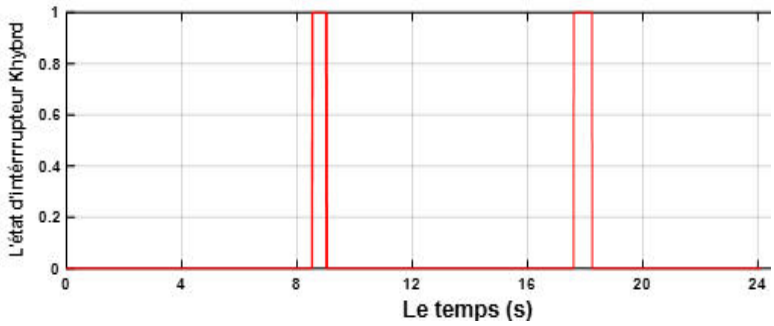


FIGURE 4.19 – L'état d'interrupteur hybride.

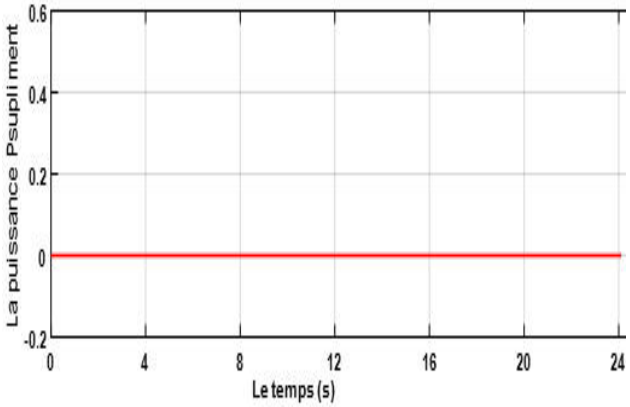


FIGURE 4.21 – Puissance supplémentaire (P supliment).

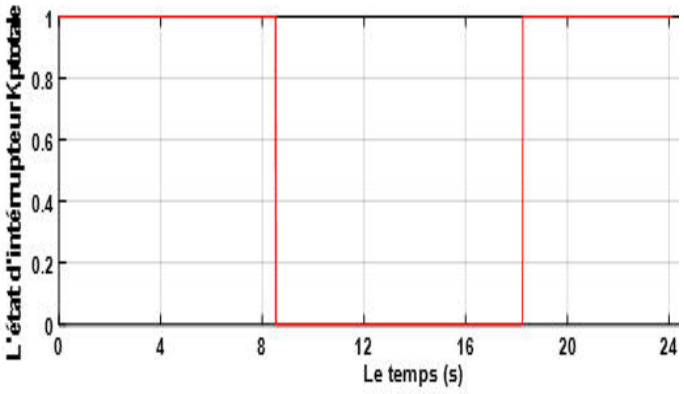


FIGURE 4.20 – L'état d'interrupteur hybride et la batterie.

⇒Analyse des résultats :

L'état de charge de la batterie est toujours compris entre les limites de seuils minimum et maximum ($0.3 < EDC < 0.9$)

⇒ Phase 1 $\boxed{\text{t = [0 - 8.32]}}$: La puissance issue du système photovoltaïque/éolien, est inférieur à la puissance demandée par la charge, et vu que EDC min $(30\%)EDCEDCmax(90\%)$, dans ce cas pour satisfaire la charge, la batterie se décharge.

⇒ Phase 2 $\boxed{\text{t = [8.32 – 8.55]}}$: La puissance produite par le système hybride est supérieure à la puissance demandée par la charge, ce qui veut dire que la charge sera alimenter, et étant donné que $EDC < EDCmax(90\%)$ et ça d'après la figure (4.15), donc la batterie seront charger par le surplus.

⇒Phase 3 $\boxed{\text{t = [8.55 – 18.1]}}$: La puissance produite par le système photovoltaïque est supérieure à la puissance produite par le système éolienne et la demande de la charge, ce qui veut dire que la charge sera alimenter par le système photovoltaïque, et la batterie seront charger par le surplus.

⇒ Phase 4 :

$\boxed{\text{t = [18.1-18.35]}}$: comportement identique aux phases 2.

$\boxed{\text{t = [18.35 24]}}$: comportement identique aux phases 1. et la batterie se décharge jusqu'à 48.3%

On constate que notre charge est alimentée constamment, et la puissance supplémentaire (P_{sup}) est nulle.

4.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous examinons la manière dont l'énergie est gérée entre les différentes sources de notre système hybride, à savoir l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et la batterie. Cette gestion énergétique est réalisée grâce à l'utilisation d'une stratégie basée sur des règles floues déterministes. Les simulations effectuées dans différentes conditions nous permettent de conclure que la supervision de cette gestion a été couronnée de succès, puisque la charge est alimentée en permanence.

Conclusion génerale :

le travail présenté dans cette mémoire est consacrée a la modélisation et simulation d'un systéme hybride (pv/éol) et aussi l'algorithme de gestion d'énergie de ce systéme dans le but d'alimenter une charge isolée sans interruption.

Dans le but d'accomplir cette cible, nous avons établi des objectifs secondaires qui ont tous été accomplis. Notre travail de recherche a débuté par une introduction générale, où nous avons identifié les problèmes associés à un système énergétique hybride basé sur les énergies renouvelables. Nous avons ensuite réalisé une revue de l'état de l'art concernant les systèmes multi-sources. Ensuite, nous avons exposé de manière plus détaillée les principaux éléments de notre système énergétique hybride : le système photovoltaïque, le système éolien, les batteries et les convertisseurs.

Nous avons également développé des modèles mathématiques décrivant le comportement des différentes composantes du SEH. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink. Afin d'optimiser la production d'énergie des sources d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et éolienne), nous avons mis en place des algorithmes MPPT et un processus de charge/décharge des batteries. Nous avons effectué plusieurs tests de simulation dans l'environnement Matlab pour évaluer les performances de ces contrôles. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de ces stratégies. Enfin, nous avons proposé une stratégie de gestion basée sur des règles floues déterministes, qui permettent de :

⇒garantir une alimentation continue de la charge.

⇒protéger les batteries contre les charges excessives et les décharges profondes.

Ce travail nous a permis de conner l'importance d'utiliser les énergies renouvlables ,par exemple notre systéme et aussi de Constater à quel point la gestion de l'énergie est importante et indispensable pour le bon fonctionnement du système.

Bibliographie

[1] A. Mahammedi, "Etude et optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque". Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif1, Algérie, 2014.

[2] Z. Hamane et H. Hassani, "Etude d'un système hybride PV/PAC/ Batteries". Mémoire de Master, Université A. Mira, Bejaia, Algérie 2018.

[3] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries super condensateurs ", Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013.

[4] S. Bensmail, « Optimisation et gestion d'un système hybride à énergies renouvelable ». Mémoire de doctorat de l'université de Bejaia, Algérie, 2017.

[5] S. Lalouni, « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride » de l'Université de Bejaia, Algérie, 2009.

[6] H. Khamtache et L.MOALI, « Gestion de puissance d'un Système Hybride ». Mémoire de master l'université de Bejaia, Algérie 2017.

[7] B. Madaci, " Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs ", Thèse Doctorat, Université de Constantine, 2018.

[8] F. Baghdadi, «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables ». Mémoire Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie 2011.

[9] Chikh-Bled, « Etude du rendement de stockage d'un système photovoltaïque appliqué au pompage hydraulique ». Thèse de Magister Université de Tlemcen, Algérie 2001.

[10] A. Mirecki, " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", thèse de doctorat en Génie Electrique, institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[11] Benbaha .A,Abri M,'Commande d'un système hybride PV/Eolien: Application soudage à Arc',Univeristé de Médea.2020

[12] A, MOUALDIA. Polycopie de cours des aérogénerature,2014-2015,Univeristé de Médea

[13] S. Maghsel, "Contribution a la modélisation et la commande d'une turbine éolienne". Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Skikda, 2010.

[14] S. Ziraoui, "Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau». Mémoire de Master en électromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.

[15] BENKHALED .B,'Etude et Modélisation d'uneChaine de Production Eolienne'2012. Université De M'SILA

[16] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes ». Thèse de doctorat en cotutelle entre l'université A. Mira de Bejaia, Algérie, et l'université de Lille1, France, 2010.

[17] Mayouf Messaud, « Contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents», Mémoire de Magister ,LEP, 2008

[18] S. Sadkine, A.Rachedi, " Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée". Mémoire de Master en électromécanique, Université A. Mira, Bejaia, 2017.

[19] S. Ziraoui, "Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau». Mémoire de Master en électromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.

[20] M. Latreche, «Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système pv». Mémoire de Master en Électrotechnique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019.

[21] M. Latreche, «Commande floue de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien». Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.

[22] S. Sadkine, A.Rachedi, " Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée". Mémoire de Master en électromécanique, Université A. Mira, Bejaia, 2017.

[23] A. Miricki, « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.

[24] B. Louzazna, S. Madi, "Etude et Caractérisation d'un panneaux photovoltaïque type condor". Mémoire de Master en électrotechnique, Université A. Mira, Bejaia, Algérie 2015

[25] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Eolienne », Techniques de l'Ingénieur, BM 4640

[26] Boulkhrachef, S.,Habilation A diriger des recherches 2020-2021,Université de Médea.

[27] Bouhedda Ali, «Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2011

[28] A. Zaimi," Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents ", Mémoire d'ingénieur cnam, Coservatoire natonal des arts et matiers, maroc, 2014.

[29] TOUAHRIA.L,YOUSFI.Y,'Gestion de puissance d'un système hybride(Pv-Eolien),2017,Université de bejaia

[30] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingéniorat, UMMTO, 2012.

[31] A, MADJBER. Polycopie de cours énergie renouvelable,2018-2019,Université de Médea.

[32] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingéniorat, UMMTO, 2012.

[33] Anne Labouret, Michel Villoz : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3éme édition 2006.

[34] Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010

[35] https ://total.direct-energie.com/

[36] L. Ait Kaki, "Etude d'un système hybride éolienne-photovoltaïque". Mémoire de Master en Physique, Université Des Freres Mentouri, Constantine1, Algérie 2016.

[37] M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia « Le Pompage Photovoltaïque » rapport du Centre De Développement. des Energies Renouvelables, Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 69-7

[38] M.Chergui .A.Bouhla .A.Aouadi Etude et Simulation des convertisseurs statiques Mémoire de licence en Génie Électrique Université DR. YAHIA F A RES DE MEDEA 2020-2021

[39] R. Rouas, "Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque", thèse de doctorat en Génie Electrique, Université mouloud mammeri de tizi–ouzou, 2018.

[40] B. benlahbib, " Supervision d'un système hybride éolien- Photovoltaïque connecté au réseau électrique ", Thèse Doctorat en science en électronique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2019.

[41] IRENA, Renewable Capacity Statistics 2020. (International Renewable Energy Agency). [Online].Available : https ://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity Statistics2020-FR

[42] http ://www.aps.dz/economie/101347-energies-renouvelables-produire-15-000-mw-electricite-a-l-horizon-2035

[43] Alain Ricaud. « Systèmes photovoltaïques ». Polytech' Savoie 5eme année Oct 2011

[44] Sciences Physiques Etats-Unis Recherche Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis Juin 2006.

[45] Mr Belaiche Hacene ((etude d'une installation en energie photovoltaique integree au batiment : cas d'un laboratoire au cder)) master professionnel en genie mecanique option energetique specialite energies renouvelables . Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

[46] A. Tchapo SINGO, " Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ", thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[47] S. Hakim et al, "Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques",vol.20,no.4,pp.1033–1041,2017,[Online]. Available :http ://search.proquest.com/openview/962ef2f45d566f02caf9224be7b88280/1 ?pq origsite=gscholar cbl=2031961.

[48] S. Abouda , " Contribution a la commande des systèmes photovoltaïques :Application aux systèmes de pompage ", Thèse de doctorat en DEA Electrotechnique .Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX, Avril 2015.

[49] D. Rekioua, Hybrid Renewable Energy Systems Overview. 2020 , doi : 10.1007/978-3-030 34021-6_1.

[50] C. Cabal, " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", thèse de doctorat en Génie Electrique, Universite Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.