REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Thème

Commande d'un système hybride PV/Eolien: Application soudage à Arc

---

Proposé et Dirigé par :

- Dr. MOUALDIA Abdelhafidh
- Mr. MAHDAB Salim

Préparé et présenté par :

- Benbaha Allel
- Abri Mohamed Seddik

Promotion 2020

Remerciements

Avant Tout, Je Remercie ***Allah*** *Le Tout-Puissant De M'avoir Donné Le Courage pour que nous puissions achever ce modeste travail.*

Je tiens à remercier vivement Monsieur ***MOUALDIA Abdelhafidh****, mon encadreur, Professeur à l'université de yahia farés, Médéa, pour son encadrement, son suivi permanent et sa confiance dans ce travail,*

On remercie également vivement monsieur ***MAHDAB Salim****, mon Co-encadreur, Professeur à l'université de yahia farés, Médéa, pour son encadrement, son soutien permanent et pour m'avoir toujours traité.*

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur ***KARA Redha,*** *pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être le président du jury de cette mémoire de fin d'étude.*

Je tiens également à remercier vivement le jury Monsieur ***MORSLI Abdelkader*** *pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être un examinateur de cette mémoire.*

Enfin, Je remercie Vivement Tous Les Personnes qui ont de prés ou de loin participé à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je Dédie Ce Modeste Travail à Mes Chère Parents Symbole De Tendresse Profonde Et Permanente, Que Dieu Les Protègent Pour Moi Et Leur Accordent Une Bonne Santé Et Une Longue vie. Mes Cher Frères; Atout Ceux Qui M'on Aidé A Réaliser De Prés Ou De Loin Ce Mémoire et Particulièrement mon frère Abdeslam hadjhameur

ALLEL

Résumé

ملخص

نظرا للتزايد العالمي على الطاقة، فان مصادر الطاقة المتجددة (الرياح، الألواح الضوئية....) ،تمثل بديلا مهما لتزويد المواقع المعزولة بالكهرباء .و مع ذلك فان هاته المصادر غير مواتية لأنها تتميز تتعلق بالظروف الطبيعية العشوائية ومن اجل الحد من التقلبات في الإنتاج وتلبية متطلبات فان الحل الذي ينبغي إتباعه هو تجميع المصادر المختلفة لتوليد الطاقة الكهربائية لتكوين النظام الهجين.

يعتبر هذا العمل مساهمة في دراسة أنظمة الطاقة الهجينة المستقلة والتي تتكون من : الألواح الشمسية ، الرياح و البطاريات لتغذية آلة لحام بمنطقة أدررا جنوب الجزائر،من عدة وجهات :النمذجة،التحكم،التسييروالمحاكات.تعتبر أنظمة الطاقة الكهروضوئية والرياح مصادر أساسية، في حين يتم استخدام البطارية كمصادر احتياطية للطاقة في حين تستخدم شحنات إضافية لاستهلاك الطاقة الزائدة عندما تكون البطارية مشحونة بالكامل حيث نقترح في هذا العمل إستراتيجية التحكم القائمة على المنطق الضبابي للسيطرة على النظام الهجين المستقل.

تم عرض نمذجة ومحاكاة الأنظمة الضوئية وطاقة الرياح مع الخوارزمية لاستخراج أقصى قدر ممكن من الطاقة وللحفاظ على توتر مصدر التوتر المستمر بقيمته الرجعية، نقترح خوارزمية تحكم معتدلة تتطلب التحكم في المحول ثنائي الاتجاه المستمر_المستمر بين البطارية و موصل التوتر المستمر. النتائج التي تم الحصول عليها مع برنامج ما تلاب،تظهر كافة الخوارزميات المختلفة المستخدمة.

كلمات مفتاحيه : أنظمة الطاقة الهجينة، الأنظمة الضوئية ،طاقة الرياح، آلة اللحام، البطارية، تسيير الطاقة ،التحكم، المحاكاة .

Résumé

A cause de la croissance mondiale de la demande énergétique, les sources d'énergies renouvelables (l'éolienne, photovoltaïque..) représentent une alternative intéressante pour l'électrification des sites isolés. Cependant, ces sources ont un inconvénient de dépendre aux conditions météorologiques. Afin de réduire les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources et de satisfaire les exigences de la charge la solution à retenir est l'assemblage des différentes sources de production d'énergie électrique pour former un système hybride.

Ce travail est une contribution à l'étude d'un système d'énergie hybride autonome, qui est constitué par les systèmes : photovoltaïque (PV), éolien, et le système de stockage afin d'alimenter un poste à souder situé dans la région d'Adrar au sud d'Algérie, sur plusieurs aspects : modélisation, commande, gestion et simulation. Les systèmes PV et éolien sont considérés comme des sources principales, tandis que la batterie est utilisé comme une source de secoures, par contre les charge auxiliaires est utilisé pour consommer l'excédent de puissance disponible lorsque la batterie est complètement chargée. On a proposer une stratégie de la gestion à base de règles déterministe floues pour contrôler le système multi-sources autonome proposé.

La modélisation et la simulation des systèmes PV et éolien ont été présentées avec application d'une commande MPPT pour maximiser la puissance délivrée. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel Matlab / Simulink montre l'efficacité des différentes commandes utilisées.

Mots Clés : système d'énergie hybride, photovoltaïque, éolien, poste à souder, système de stockage, gestion d'énergie, commande, simulation et MPPT.

Abstract

Because of the global growth in energy demand, renewable energy sources (photovoltaic, wind ...) represent an interesting alternative for the electrification of isolated sites. However, these sources have a disadvantage of being dependent on weather conditions. In order to reduce fluctuations in production caused by the random nature of these resources and to satisfy the requirements of the load the solution to be retained is the assembly of the different sources of electric power generation.

This work is a contribution to the study of an autonomous hybrid energy system, which consists of systems: photovoltaic (PV), wind, and a storage system to supply a welded machine located in the Adrar region in southern Algeria, on several aspects: modeling, control, supervision and simulation. PV and wind systems are considered primary sources; the battery is used as emergency source. The auxiliary load is used to consume the excess power available when the battery is fully charged. A management strategy based on the fuzzy logic is designed to control the proposed autonomous multi-source system.

The modeling and simulation of the PV and wind systems were presented with an MPPT command to maximize the power delivered. The results obtained with the Matlab / Simulink software show the efficiency of the various commands used.

Key Words: Hybrid power system, Photovoltaic, Wind, Storage system, welding machine, power management, Control, Simulation, and MPPT.

Liste des figures

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

Figure I.1. Systèmes hybrides....4
Figure I.2. Classification des systèmes hybrides....4
Figure I.3. Configuration du système hybride à bus continu. 5
Figure I.4. Configuration du système hybride à bus alternatif. 6
Figure I.5. Configuration du système hybride à deux bus à CC et CA. 6
Figure I.6. La composition du soleil. 7
Figure I.7. Les deux types d'énergie solaire. 8
Figure I.8.spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil. 9
Figure I.9. Composants du rayonnement solaire. 9
Figure I.10. Structure d'une cellule PV. 10
Figure I.11. Effet photovoltaïque. 11
Figure I.12 .cellule monocristalline 12
Figure I.13 .cellule poly cristallin....12
Figure I.14. Cellule amorphe 13
Figure I.15. Cellule, module et panneau photovoltaïque. 13
Figure I.16. Moulins à vent. 16
Figure I.17. Eolienne de 100 kW de Grand Vent 1957. 16
Figure I.18. Éolienne de Savonius. 18
Figure I.19. Éolienne de Darrieus. 18
Figure I.20. Éoliennes à axe vertical : (a) éolienne lente, (b) éolienne rapide. 19
Figure I.21. Configuration à axe horizontal. 20
Figure I.22. Les composants de l'aérogénérateur. 22
Figure I.23. Conversion de l'énergie éolienne. 23
Figure I.24 .tube de courant autour d'une éolienne. 24
Figure I.25. CP en fonction de λ pour différents types d'éoliennes. 25
Figure I.26 .systèmes éoliens basés sur la GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI....27
Figure I.27. Caractéristique puissance / vitesse du vent. 28
Figure I.28. Batterie au Plomb-acide 30
Figure I.29 . Principe de fonctionnement d'une batterie....30
Figure I.30. Système de supervision. 33
Figure I.31. Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie....33
Figure I.32 . Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol. 34
Figure I.33 . Classifications des procédés de soudage 35
Figure I.34 . Principe de soudage à l'arc électrique. 36

Chapitre II : Modélisation des composants du SEH

Figure II.1. Architecture du système d'énergie hybride étudié 40
Figure II.2. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV....40
Figure II.3. Caractéristique Ipv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque....43
Figure II.4 . Courbe Ppv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque. 43
Figure II.5 . Influence de la température sur la caractéristique I=f(V). 44
Figure II.6 . Influence de la température sur la caractéristique P=f(V). 44
Figure II.7 . Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V). 44
Figure II.8 . Influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V). 45
Figure II.9 . Schéma de principe d'un convertisseur survolteur....45
Figure II.10. Caractéristique du coefficient Cp (λ,β) pour plusieurs valeurs de β 48

Liste des figures

Figure II.11. Le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.....49
Figure II.12 . Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park 51
Figure II.13. Schéma du redresseur PD3 à diodes 53
Figure II.14. Modèle R-C de la batterie.....54
Figure II.15. Modèle CIEMAT de la batterie. 55
Figure II.16. Hacheur réversible en courant.....56
Figure II.17. Modèle du bus continu.....56
Figure II.18. Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux. 57

Chapitre III : Commande et simulation d'un SEH

Figure.III.1. Schéma du SEH global.....59
Figure III.2. Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT 60
Figure.III.3. Principe de la MPPT avec la méthode P&O. 61
Figure.III.4. Organigramme de la méthode perturbation et observation (PO). 61
Figure III.5. Structure de base du contrôleur flou MPPT. 62
Figure III.6. Fonctions d'appartenance des entrées : E, CE et de la sortie ΔD 63
Figure III.7. Schéma bloc du système photovoltaïque dans l'environnement Matlab 64
Figure.III.8. Profil de l'éclairement.....64
Figure III.9. Profil de la température 65
Figure.III.10. Principaux résultats du test.....65
Figure.III.11. Caractéristiques de voilure dans le plan puissance-vitesse.....66
Figure.III.12. Structure de contrôle d'une turbine éolienne.....67
Figure.III.13. Schéma bloc global de la chaine éolienne dans l'environnement Matlab 70
Figure.III.14. Bloc de simulation de la turbine éolienne.....70
Figure III.15. Profil du vent.....71
FigureIII.16. Puissance du système éolien.....71
Figure III.17. Couple électromagnétique 71
Figure III.18 .Vitesse de rotation 71
Figure III.19. Vitesse spécifique 71
Figure III.20.Coefficient de puissance.....71
Figure III.21. Courant : ia, ib et ic de la MSAP. 72
Figure III.22. Courant de sortie du redresseur.....72
Figure III.23. Schéma de commande de la tension du bus continu 73
Figure III.24. Structure de contrôle de l'hacheur réversible en courant 73
Figure III.25.régulation de bus continue 75
Figure.III.26. Principe de la modulation de la largeur d'impulsion M.L.I. 76
Figure III.27. Tension Va de l'onduleur 76
Figure III.28. Principe de la commande 76
Figure III.29. Principe de fonctionnement du poste à soudé onduleur. 77
Figure III.30. Bloc de la charge sous matlab-simulink. 77

Chapitre IV : Gestion et simulation d'un SEH appliquée au poste à souder

Figure IV.1. Schéma du système global sous Matlab/Simulink. 79
Figure IV.2. Organigramme de gestion qui considère le système de conversion éolien.....85
Figure IV.3 Organigramme de gestion qui considère le système de conversion 86
Figure IV.4. Système de supervision à base de la logique floue.....88
Figure IV.5. Fonctions d'appartenance de delta P0, P1, P2.....89
Figure IV.6. Fonctions d'appartenance de delta P3.....89
Figure IV.7. Fonctions d'appartenance d'EDC 90
Figure IV.8. Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie. 90
Figure IV.9. Evolution des données d'entrée (irradiation, température et vent). 91

Liste des figures

Figure IV.10. Evolution de la tension Vpv ……..…..…91
Figure IV.11. Evolution de courant Ipv ……..……91
Figure IV.12. Evolution de la vitesse de rotation (rd/s) ……..…….....92
Figure IV.13. Evolution de couple Cem.....92
Figure IV.14. Evolution de la tension Vdc ……..…….....92
Figure IV.15. Evolution d'EDC.....92
Figure IV.16. Evolution de courant decharge.……92
Figure IV.17. Evolution de la tension de charge.....92
Figure IV.18. Profile de Pch, Ppv, Peol et P batt.....93
Figure IV.19. L'état d'interrupteur photovoltaïque. 93
Figure IV.20.L'état d'interrupteur éolien.....94
Figure IV.21.L'état d'interrupteur hybride 94
Figure IV.22.L'état d'interrupteur hybride et la batterie 94
Figure IV.23. Puissance supplémentaire (P supliment).....94

Liste des tableaux

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

Tableau I.1. Classification des systèmes hybrides par gamme de puissance.....4
Tableau I.2 . Classification des turbines éoliennes.....20
Tableau I.3. Avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable.....21

Chapitre III : Commande et simulation d'un SEH

Tableau.III.1. Table d'inférence du MPPT flou 63

Chapitre IV : Gestion et simulation d'un SEH appliquée au poste à souder

Tableau IV.1. L'état de chaque composant constituant le SEH 81
Tableau IV.2. Scénarios de fonctionnement d'SEH pendant un jour ensoleillé ou nuageux 83
Tableau IV.3. Scénarios de fonctionnement du système hybride 83
Tableau IV.4 Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion. 87
Tableau IV.5. Différents modes d'alimentation de la charge principale.....87

Abréviation

ER : Energie Renouvelable

AC : Courant Alternatif « Alternatif Current ».

Bus CC : Bus à courant continu.

CIEMAT : Centre de recherche énergétique environnementale et technologique (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediombientales y Technologicas).

DC : Courant continu « direct current ».

EDC : Etat de charge.

Fem : Force électromotrice.

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanant.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum power point tracking (Recherche du maximum de puissance).

PN : Une zone du cristal, passant d'un dopage p à un dopage n.

PI : Proportionnel intégral.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Perturbation et observation : Commande de perturbation et observation.

SEH : Système d'énergie hybride.

STC : Conditions standards de fonctionnement.

Wc : Watt-crête (puissance maximale dans les conditions standards de fonctionnement).

Wt : Wind turbine (éolienne).

Nomenclature

Symboles

CE : La variation de l'erreur dans l'algorithme FLC **[-].**

$\boldsymbol{\Delta I}$: La variation du courant **[A]**.

$\boldsymbol{\Delta P}$: La variation de la puissance **[W].**

$\boldsymbol{\Delta V}$: La variation de la tension **[V].**

ʎ : Rapport entre la vitesse des pales et la vitesse du vent **[/].**

$\boldsymbol{Cbatt}$: Capacité de stockage de la batterie **[Ah]**.

Cp : Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine **[-].**

$\boldsymbol{D}$: Rapport cyclique **[-].**

$\boldsymbol{E0}$: Tension à vide de la batterie **[V].**

$\boldsymbol{E}$: L'erreur de l'algorithme FLC **[-].**

$\boldsymbol{G}$: L'irradiation solaire **[W/m²].**

Ipv : Courant photovoltaïque **[A].**

I$\boldsymbol{ph}$: Le photon courant de la cellule **[A].**

Id : Courant traversant la diode dans le circuit équivalent de la cellule PV **[A].**

Ip : Courant traversant la résistance parallèle **[A].**

Icc : Courant de court circuit **[A].**

Ired : Le courant redressée **[A].**

$\boldsymbol{Pbatt}$: Puissance de la batterie **[W].**

$\boldsymbol{P}$**éol** : Puissance de l'éolienne **[W].**

$\boldsymbol{Ppv}$: Puissance du Panneau photovoltaïque **[W].**

$\boldsymbol{Pch}$: Puissance de charge **[W].**

ieol: Courant fournie par le système éolien **[A]**.

ic: Courant qui traverse la capacité **[A]**.

ihyb: Courant produit par le système hybride PV-éolien **[A]**.

ibatt : Courant de la batterie **[A].**

ich : Courant de la charge [$\boldsymbol{A}$].

K : Constante de Boltzmann (K=1.38 J/k) **[J/k].**

α: Facteur d'idéalité **[-].**

Rp : Résistance shunt (Parallèle) [**Ω**].

Nomenclature

Rs : Résistance série [**Ω**].

T : La température de la cellule **[°C].**

Vred : La tension redressée **[V].**

Vco : Tension en circuit ouvert **[V].**

$\boldsymbol{J}$: Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine **[Kg. m²].**

$\boldsymbol{f}$: Coefficient de frottement dynamique **[N.m/ rd.** $\boldsymbol{s^{-1}}$**].**

C$\boldsymbol{em}$: Couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone **[N.m].**

$\boldsymbol{\Omega t}$: Vitesse de la turbine **[tr/min].**

[$\boldsymbol{Vs}$]$\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$: Le vecteur des tensions statoriques [$\boldsymbol{V}$]**.**

[$\boldsymbol{Vr}$]$\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$: Le vecteur des tensions rotoriques [$\boldsymbol{V}$]**.**

[$\boldsymbol{is}$]$\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$: Le vecteur des Courants statoriques [$\boldsymbol{A}$]**.**

[$\boldsymbol{ir}$]$\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$: Le vecteur des Courants rotoriques [$\boldsymbol{A}$].

[$\phi\boldsymbol{s}$]$\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$: Le vecteur des flux à travers les phases statoriques [$\boldsymbol{Wb}$]**.**

[$\phi\boldsymbol{r}$]$\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$**:** Le vecteur des flux à travers les phases rotoriques [$\boldsymbol{Wb}$]**.**

$\boldsymbol{Ls}$, $\boldsymbol{Lr}$: Inductance propre d'une phase statorique et rotorique [$\boldsymbol{H}$].

$\boldsymbol{Ms}$: Inductance mutuelle entre les phases statoriques [$\boldsymbol{H}$].

$\boldsymbol{Mr}$: Inductance mutuelle entre les phases rotoriques [$\boldsymbol{H}$].

$\boldsymbol{Msr}$, $\boldsymbol{Mrs}$ **:** Inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique **[**$\boldsymbol{H}$**]**.

Isat : Courant de saturation de la diode **[A].**

q : Charge de l'électron **[q=1.60217646** $\boldsymbol{10^{-19}}$ **C].**

V : Vitesses du vent **[m/s].**

ρ : Masse volumique de l'air **[kg/**$\boldsymbol{m^3}$**].**

β: Angle de calage **(°).**

R : Rayon de la pale **[m].**

Caer : Couple aérodynamique de l'éolienne **[Nm].**

$\boldsymbol{\Omega}$mec : Vitesse mécanique du générateur **[tr/min].**

Cr : Couple résistant **[Nm].**

Vdc : Tension aux bornes du bus continu **[V].**

Table des matières

Table des matières

Remerciements.....

Dédicaces .....

Résumé……..

Liste des figures.....

Liste des tableaux .....

Nomenclature .....

Table des matières .....

Introduction Générale 1

I. Chapitre 1 : Etat de l'art sur le système de production d'énergie hybride.....3

I.1. Introduction.....3

I.2. Généralités sur les systèmes électriques hybrides (SEH) 3

I.2.2. Classifications des systèmes d'énergies hybrides :.....4

I.2.3. Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH).....5

I.2.3.1. Architecture à bus continu (CC) 5

I.2.3.2. Architecture à bus alternatif AC 5

I.2.3.3. Architecture mixte à bus à CC/CA.....6

I.2.4. Système hybride étudié (photovoltaïque/éolien/batteries) 6

I.2.5. Avantages et inconvénients du système hybride étudié 7

I.2.5.1. Avantages 7

I.2.5.2. Inconvénients.....7

I.3. Généralité sur les différents composants du système hybride étudié 7

I.3.1. Généralités sur les systèmes photovoltaïques.....7

I.3.1.1. Rayonnement solaire.....8

I.3.1.2. Définition et historique du photovoltaïque 9

I.3.1.3. Cellule photovoltaïque 10

I.3.1.4. Systèmes photovoltaïques.....13

I.3.1.5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque 14

I.3.2. Généralités sur les systèmes éoliens 15

I.3.2.1. Historique de l'énergie éolienne 15

I.3.2.2. Modes d'installation et différents types d'éoliennes.....17

I.3.2.4. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur 23

I.3.2.5. Notions Théoriques sur L'aérogénérateur 23

I.3.2.6. Machines électriques dans les aérogénérateurs.....25

I.3.2.7. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....28

Table des matières

I.3.2.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [3] [10] 29
I.3.3. Système de stockage 30
I.3.3.1. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb acide 30
I.3.3.2. Caractéristiques des batteries 31
I.3.4. Les convertisseurs statiques 32
I.3.4.1. Convertisseur CA/CC (redresseur) 32
I.3.4.2. Convertisseur CC/CA (onduleur) 32
I.3.4.3. Convertisseur CC/CC (hacheur) 32
I.3.5. Le système de supervision 32
I.4. Etat de l'énergie Renouvelable en Algérie 33
I.4.1. Energie solaire en Algérie 34
I.5. Généralités sur le soudage 35
I.5.1. Procédés de soudage 35
I.5.2. Soudage à l'arc électrique 36
I.5.3. Les paramètres de soudage 36
I.5.3.1. L'intensité du courant de soudage 36
I.5.3.2. La tension du soudage 37
I.5.3.3. Energie nominale et vitesse de soudage 37
I.5.3.4. Le type de courant de soudage : Alternatif (CA) ou continu (DC) 37
I.5.4. Poste à souder onduleur 37
I.6. Conclusion 38
II. Chapitre 2 : modélisation des composants du SEH 39
II.1. Introduction : 39
II.2. Outils de modélisation 39
II.3. Modélisation de la chaine de production photovoltaïque 40
II.3.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque 40
II.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque 41
II.3.2.1. Courant de court-circuit, ICC 41
II.3.2.2. Tension de circuit ouvert : 42
II.3.2.3. Puissance maximale 42
II.3.2.4. Facteur de forme 42
II.3.2.5. Le rendement : 42
II.3.3. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque 43
II.3.3.1. Caractéristique Courant-Tension 43
II.3.3.2. Caractéristique puissance –tension 43

Table des matières

II.3.3.3. Influence de la température 43
II.3.3.4. Influence de l'éclairement 44
II.3.4. Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST) 45
II.4. Modélisation de la chaine de production éolienne 46
II.4.1. Modélisation de la vitesse de vent 46
II.4.2. Modélisation de la turbine 47
II.4.3. Modélisation du Multiplicateur : 48
II.4.4. Modélisation de l'Arbre Mécanique : 49
II.4.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents 49
II.4.5.1. Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a, b, c) : 50
II.4.5.2. Modèle de la MSAP dans le repère de Park : 51
II.4.5.3. Expression du couple électromagnétique : 52
II.4.5.4. Equations mécaniques : 53
II.4.6. Modélisation du redresseur PD3 à diodes 53
II.5. Modélisation de la batterie 54
II.5.1. Modèle R-C 54
II.5.2. Le modèle ≪ CIEMAT ≫ 55
II.5.3. Modélisation du hacheur réversible en courant 55
II.6. Modélisation du bus continu 56
II.7. Modélisation de l'onduleur triphasé 57
II.8. Conclusion 58
III. Chapitre 3 : commande et simulation d'un SEH 59
III.1. Introduction 59
III.2. Description des algorithmes MPPT 59
III.2.1. Commande de la chaine de conversion photovoltaïque 60
III.2.1.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) 60
III.2.1.2. Méthode logique floue 62
III.2.1.3. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque 64
III.2.2. Commande de la chaine de conversion éolienne 66
III.2.2.1. La commande en couple. 67
III.2.3. Simulation de la chaine de conversion éolienne 69
III.3. Contrôle de la tension Vdc du bus DC par le système de stockage 72
III.3.1.1. Boucle de régulation de la tension Vdc 74
III.3.1.2. Simulation du bus continu (test de robustesse) 75
III.4. Stratégies de commande de l'onduleur 75

Table des matières

III.5. Régulation du courant de poste onduleur 76

IV. Chapitre 4 : Gestion et simulation des systèmes d'un SEH appliquée au poste à souder onduleur 79

IV.1. Introduction 79

IV.2. Différentes modes de fonctionnement du système hybride 80

IV.2.1. Différents scénarios de fonctionnement du SEH 82

IV.2.1.1. Scénarios de fonctionnement pendant un jour ensoleillé ou nuageux 82

IV.2.1.2. Scénarios de fonctionnement pendant la nuit 83

IV.3. Système de supervision du SEH 84

IV.3.1. Stratégie de gestion à base de règles floues 88

IV.3.1.1. Mise en œuvre du système flou 88

IV.3.1.2. Choix des fonctions d'appartenance 89

IV.4. Interprétation des résultats obtenus par la simulation 90

Conclusions Générales 96

Références bibliographiques……...

Annexes……..

Introduction Générale

Les sources d'énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont vouées à se tarir au cours des prochaines décennies. Elles sont à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO2, cause principale de l'augmentation de l'effet de serre. Face à ces problèmes, l'avenir de la production d'électricité est résolument tourné vers l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable (ER). Ces dernières offrent de nombreux avantages, d'être d'origines naturelles, propres, inépuisables et non polluantes [1].

Les efforts à entreprendre dans le domaine des énergies renouvelables sont considérables car Selon International Renewable Energy Agency 2020 (IRENA.2020), la production mondiale d'énergie renouvelable n'était que 1 226. 85 GW en 2010 alors que en2019sera 2 536 .85 GW.

Dans ce contexte, durant l'année 2019, au moins de 97 GW de capacité PV solaire ont été ajoutés dans le monde. À la fin de l'année, cette quantité atteignait, au niveau mondial, au moins de 580 GW. Pour l'énergie éolienne, l'année 2019 a vu près de 58.8 GW de capacité éolienne ajoutée, avec une augmentation totale mondiale d'environ 10%, presque de 622.7 GW. [2]

Les réseaux électriques ne peuvent suffire à fournir de l'électricité à toute la population mondiale qu'ils soient en milieux désertiques, montagneux ou sur les îles où la connexion est prohibitive. En effet, les ressources d'ER sont déployées pour fournir de l'électricité à zones isolées. Cependant, le caractère aléatoire représente le principal inconvénient dans ces ressources. Pour cela, elles sont souvent associées à d'autres sources d'énergie pour constituer les systèmes d'énergies hybrides (SEH), afin de regrouper les avantages de ces ressources dans le but de satisfaire les exigences de la charge, tout en minimisant leurs inconvénients**.** **[**3]

La batterie, malgré son coût relativement élevé et sa durée de vie très limitée, représente un bon complément aux sources d'ER. Elle est utilisée pour la production d'énergie électrique dans les régions isolées, afin de réduire les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources. D'où la nécessité de réduire son utilisation au minimum, dans le but d'éviter sa dégradation par des décharges profondes ou des surcharges [1].

Dans ce projet la structure choisie pour un SEH autonome est constituée par la connexion des éléments suivants : générateur photovoltaïque (GPV), générateur éolien à base de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP) et une batterie.

Tous ces composants sont reliés à un bus continu afin d'alimenter un poste à souder à arc (poste onduleur) de type DC et des charges supplémentaires DC ou AC, ce poste utilisé pour soudé des pipelines situé dans la région d'adrar au sud d'Algérie.

Une fois la constitution du SEH est achevée, la question principale que l'on doit se poser est: Comment gérer l'énergie produite par ces différentes ressources d'une manière optimale ?

Le défi fondamental dans le fonctionnement d'un SEH est la gestion de la puissance délivrée par les ressources énergétiques. Par conséquent, un système de gestion efficace est nécessaire afin de trouver la meilleure répartition de la puissance entre les différents éléments constituant le SEH. [1]

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 architectures des systèmes électriques multi-sources. Puis nous donnons une étude descriptive des sources d'énergie qui composent notre système. Ensuit l'état des sources éoliennes et solaires en Algérie sera présenté. Finalement, la dernière section de ce chapitre est consacrée à un état de l'art sur le soudage à arc.

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'environnement Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre expose les commandes nécessaires à la gestion d'énergie dans le système de production hybride autonome. Nous commençons par l'optimisation des sources d'énergie renouvelable photovoltaïque et l'éolien 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 et nous terminons par la régulation de courant de poste à soudé, dans le but de faciliter la gestion d'énergie de ce type de système, 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 poste à souder à arc.

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

I. Chapitre 1 : Etat de l'art sur le système de production d'énergie hybride

I.1. Introduction

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux [4].

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 [4].

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/éolien avec le système de stockage. Ensuit, nous donnons l'état des sources d'énergie renouvelable en Algérie. À la fin de ce chapitre nous présentons un état de l'art sur le soudage à arc.

I.2. Généralités sur les systèmes électriques hybrides (SEH)

I.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 [5].

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 [3]. 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.



Figure I.1. Systèmes hybrides

I.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 (I.2) ci dessous.

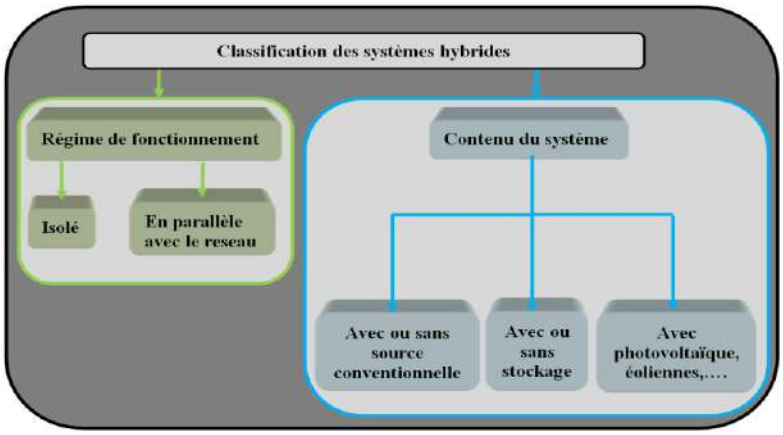


Figure I.2. Classification des systèmes hybrides [5].

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à AC et bus à DC, avec des batteries de stockage, est très répandue.

Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en-dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à DC [6]

Puissance du SEH [KW]	Applications
Faible < 10	Système autonome : stations de télécommunication, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
Moyenne entre 10 et 500	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales…
Grande > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Tableau I.1.Classification des systèmes hybrides par gamme de puissance. [7]

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100 kW, sont centrés sur le bus à AC, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau I.1). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs. [6]

I.2.3.Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH)

Les systèmes des énergies hybrides peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations comportent généralement des systèmes d'énergies renouvelables, des systèmes conventionnels et des systèmes de stockages d'énergie qui se trouvent selon différentes architectures : architecture à bus continu, architecture à bus alternatif et architecture à bus mixte.

Nous présentons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

I.2.3.1.Architecture à bus continu (CC)

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.3), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à courant continu (CC). 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 (CC). Ce type d'assemblage est adapté pour les sites isolés, les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu [5].

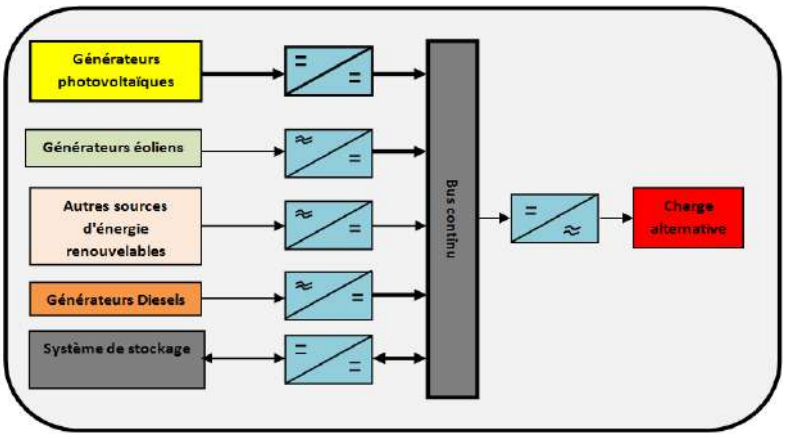


Figure I.3. Configuration du système hybride à bus continu.

I.2.3.2.Architecture à bus alternatif AC

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montré sur la figure (I.4). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les

autres convertisseurs, Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge [5].

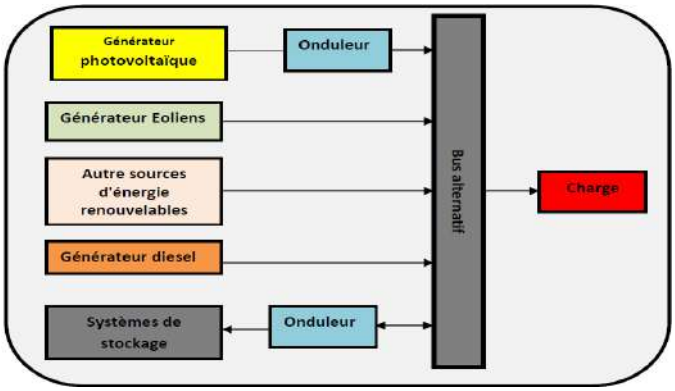


Figure I.4. Configuration du système hybride à bus alternatif.

I.2.3.3. Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la figure (1-5).Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration les sources d'énergies peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de l'onduleur. La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions de sortie du générateur CA) [5].

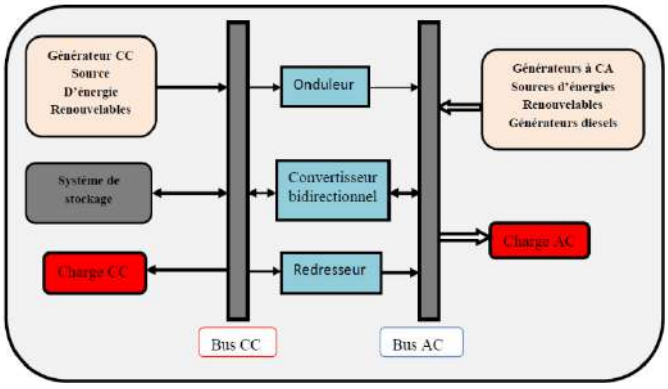


Figure I.5. Configuration du système hybride à deux bus à CC et CA.

I.2.4. Système hybride étudié (photovoltaïque/éolien/batteries)

Dans notre étude on s'intéresse principalement au système hybride qui combine les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque-éolien) 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 [1].

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.

I.2.5.Avantages et inconvénients du système hybride étudié

I.2.5.1.Avantages

- Flexible, extensible et Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Production d'une énergie propre ;
- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Exploitation simple, travaux de révision réduite [5].

I.2.5.2.Inconvénients

- Coût de réalisation élevé ;
- Complexité de système par rapport à d'autres systèmes [5].

I.3. Généralité sur les différents composants du système hybride étudié

I.3.1.Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Le Soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10*7K.

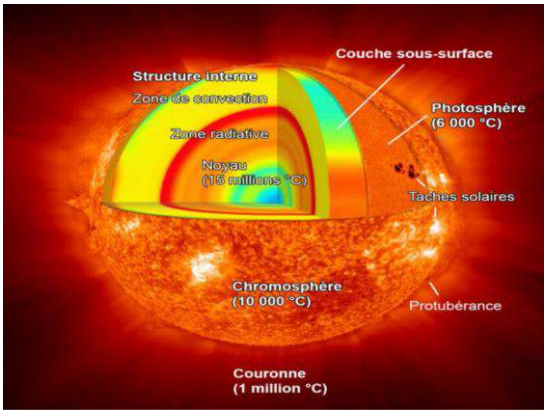


Figure I.6. La composition du soleil [8].

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, et, sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, de pétrole et de charbon [9].

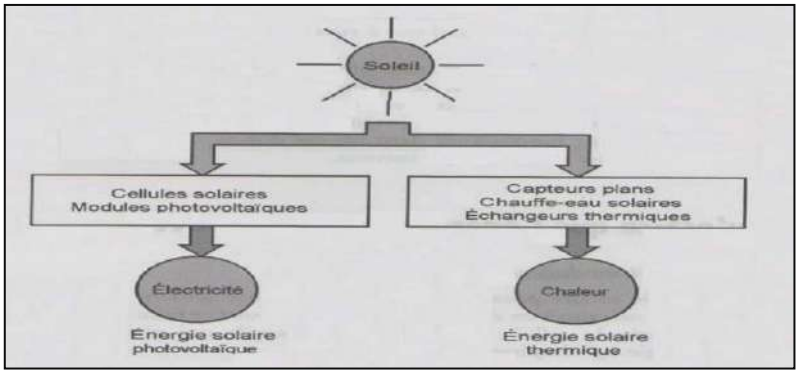


Figure I.7. Les deux types d'énergie solaire [8].

I.3.1.1.Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie *Eph,* qui répond-elle même à la relation suivante :

$$Eph = h\frac{c}{\lambda} \qquad \textbf{(I.1)}$$

Dans laquelle λ représente la longueur d'onde (m), h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière (m/s). D'après l'équation (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c'-a-d plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

On appelle masse d'air (Air Mass) en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Voir Figure. I.8). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m² (AM1.5) [6].

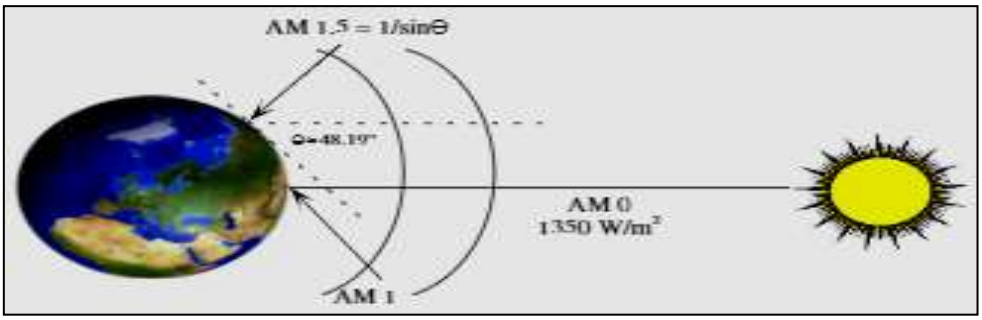


Figure I.8.spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [6].

On distingue plusieurs types de rayonnement solaire : rayonnement direct (reçu directement du soleil), rayonnement diffus (émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions), rayonnement réfléchis ou albédo (c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Le rayonnement global est la somme des rayonnements cité précédemment [10].

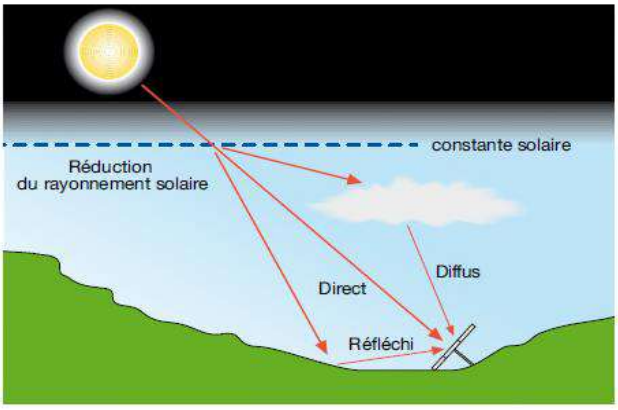


Figure I.9. Composants du rayonnement solaire [10].

I.3.1.2.Définition et historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie des photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des cellules élémentaires fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs qui réalisent cette transformation d'énergie. La puissance extraite du générateur PV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule [11].

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point unecellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie [11].

I.3.1.3.Cellule photovoltaïque

I.3.1.3.1.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de semi-conducteur qui transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, l'une dopée (P) et l'autre couche dopée (N) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

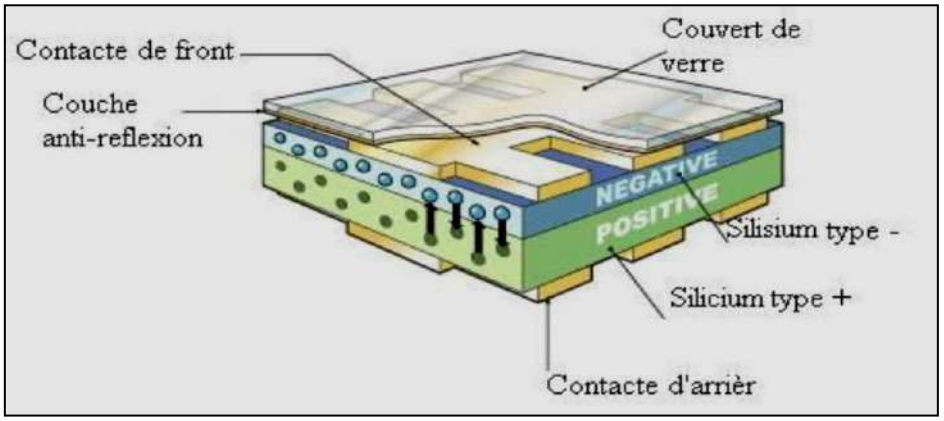


Figure I.10. Structure d'une cellule PV [10].

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule c'est ce qu'on appelle effet photovoltaïque [12]. La tension générée peut varier entre 0.3 V à 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de la cellule [13].

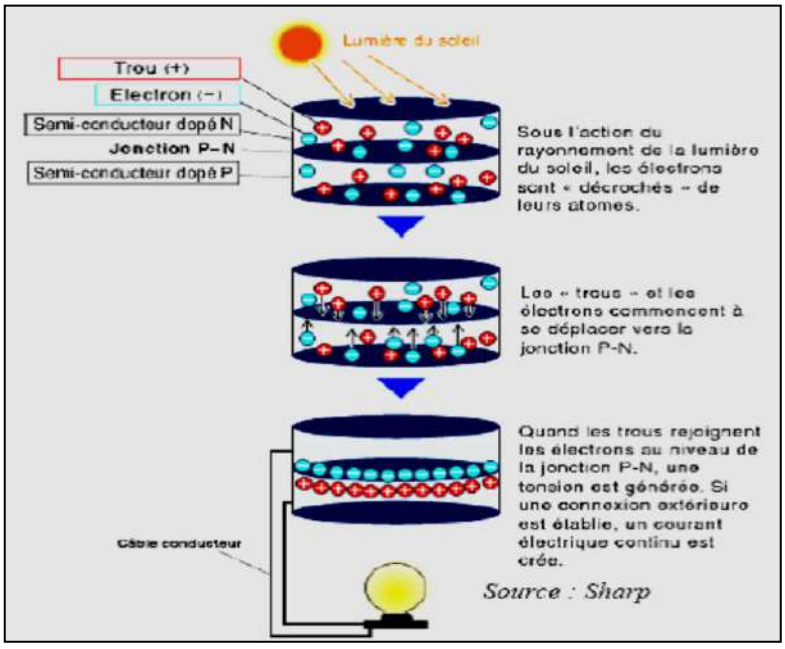


Figure I.11. Effet photovoltaïque [8].

I.3.1.3.2.Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisée par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 7 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

I.3.1.3.2.1. Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin» implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'ya aucune

perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. Le rendement pour un ensoleillement direct s'étend entre (12-16%) (23 % en Laboratoire)[10].



Figure I.12 .cellule monocristalline

I.3.1.3.2.2. Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commerciale s'étend entre 10 et 14 % [10].



Figure I.13 .cellule poly cristallin

I.3.1.3.2.3. Silicium amorphe

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [10].



Figure I.14. Cellule amorphe

I.3.1.3.3.Association des cellules photovoltaïques

Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et /ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque ; plusieurs panneaux qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque ou générateur photovoltaïque GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur et le courant de la branche reste le même. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera et la tension reste le même [11].

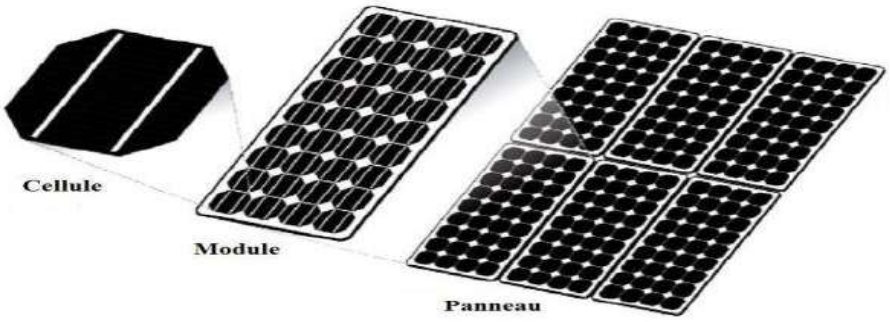


Figure I.15. Cellule, module et panneau photovoltaïque.

I.3.1.4.Systèmes photovoltaïques

I.3.1.4.1.Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les régions éloignées. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

A. Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le

dimensionnement des systèmes photovoltaïques [11].

B. Systèmes autonomes sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, c'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairement le plus faible [11].

I.3.1.4.2.Systèmes raccordés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

I.3.1.5.Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque [8] [10] [14]

I.3.1.5.1.Avantages

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- Coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

I.3.1.5.2.Inconvénients

- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- La fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 7 à 16 %,avec une limite théorique pour une cellule de 23%.
- La production d'énergie qui dépend des conditions climatiques et météorologiques.

I.3.2.Généralités sur les systèmes éoliens

Le nom "éolienne" vient du nom du dieu du vent grec, Eole. L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie de la terre. Cette énergie propre et renouvelable d'origine solaire, provenant du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est crée et la masse d'air est en perpétuel déplacement.

La technologie des aérogénérateurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes [15].

I.3.2.1.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 [16].



Figure I.16. Moulins à vent [8].

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 [16].

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 [17].



Figure I.17. Eolienne de 100 kW de Grand Vent 1957 [17].

I.3.2.2.Modes d'installation et différents types d'éoliennes

Nous trouvons deux modes d'installations des éoliennes :

- Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites « offshore » sont installées en mer où la présence du vent est plus régulière.

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

I.3.2.2.1.Selon l'axe

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

- Eoliennes à axe vertical.
- Eoliennes à axe horizontal.

I.3.2.2.1.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Les pylônes sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. En plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal. Les deux types les plus répandues sont : Savonius et Darrieus [18].

A. L'éolienne Savonius

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux

sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s

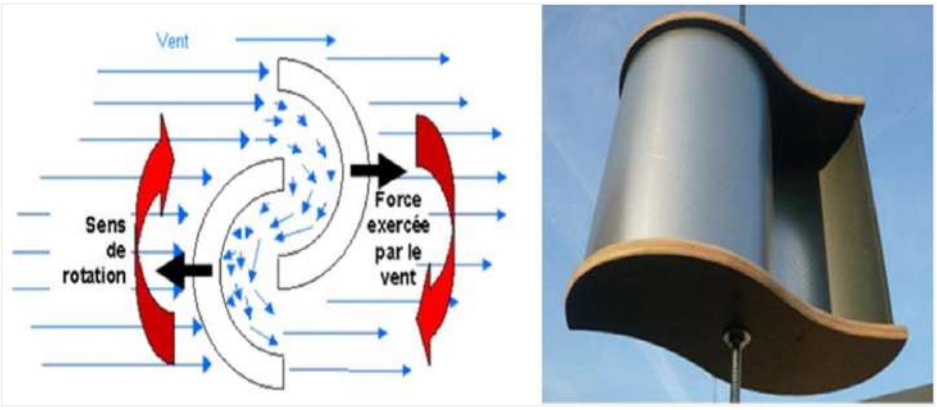


Figure I.18. Éolienne de Savonius.

B. Les éoliennes Darrieus

Le rotor de Darrieus est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence : un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.19) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [18].

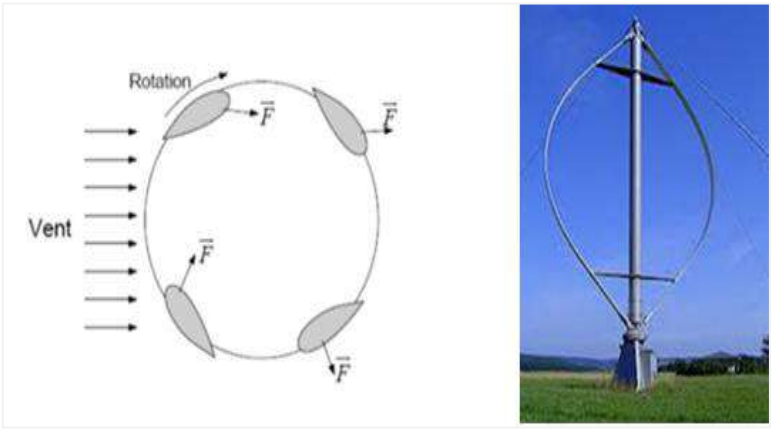


Figure I.19. Éolienne de Darrieus.

I.3.2.2.1.2. Eoliennes 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 aérodynamiquement (Figure.1.20). 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 à 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] :



a b

Figure I.20. Éoliennes à axe vertical : (a) éolienne lente, (b) éolienne rapide.

A. Eoliennes 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. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts.

Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par l'expression suivante [19] :

$P = 0.15 * D2 * V3$ **(I.2)**

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre D en mètre et la vitesse du vent V en m/s.

B. Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité d'où leur nom le plus courant "**d'aérogénérateurs**". en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [19].

Le tableau I.2propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1MW

Tableau I.2 . Classification des turbines éoliennes [19].

Il faut encor différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par apport au vent « hélice au vent »et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

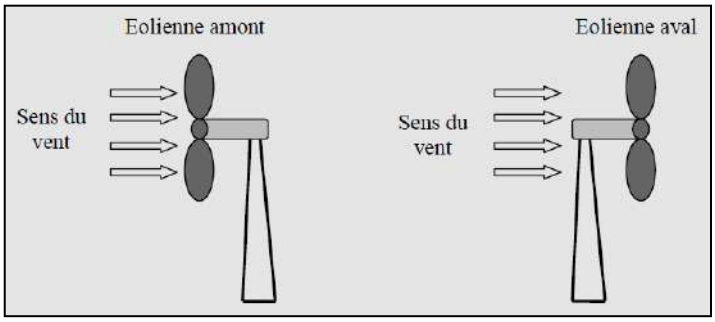


Figure I.21. Configuration à axe horizontal.

I.3.2.2.2.Selon la vitesse

A. Eoliennes 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 [20].

B. Eolienne 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 [20].

Le tableau I.3ci-dessous représente les principaux avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable :

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	• Simple, robuste, fiable. • Faible coût de construction et maintenance	• Rendement de conversion faible • Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci • Fluctuation importante de la puissance
Vitesse variable	• Fort rendement de conversiond'énergie • Puissance électrique de meilleure qualité • Stress mécanique réduit	• Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs • Contrôle du système plus compliqué

Tableau I.3. Avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable [20].

1.3.2.3. Architecture d'un aérogénérateur

L'éolienne est constituée généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrée sur la figure (I.21).

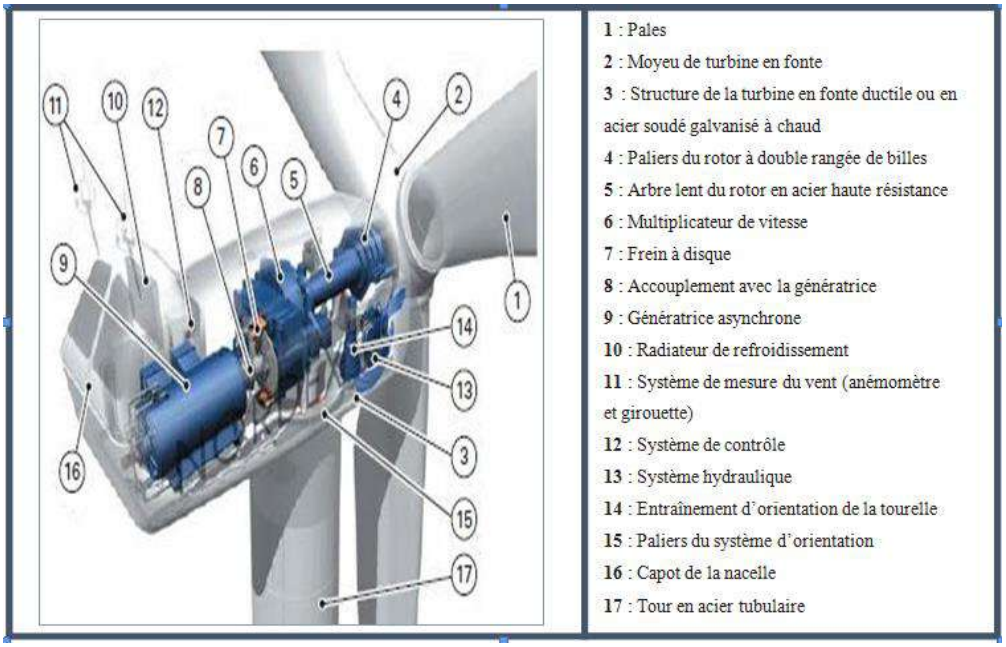


Figure I.22. Les composants de l'aérogénérateur [14].

a) La fondation : elle doit être solide pour assurer la résistance de l'ensemble.

b) Le mat ou la tour : 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.

c) Le rotor : 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% (limite de Betz).

d) La nacelle : La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler lerotor 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 utilisé pour 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.

I.3.2.4.Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes :

- Au niveau des pâles (capteur d'énergie), qui extraient une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice électrique, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au convertisseur statique [10].
- Au niveau du convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.

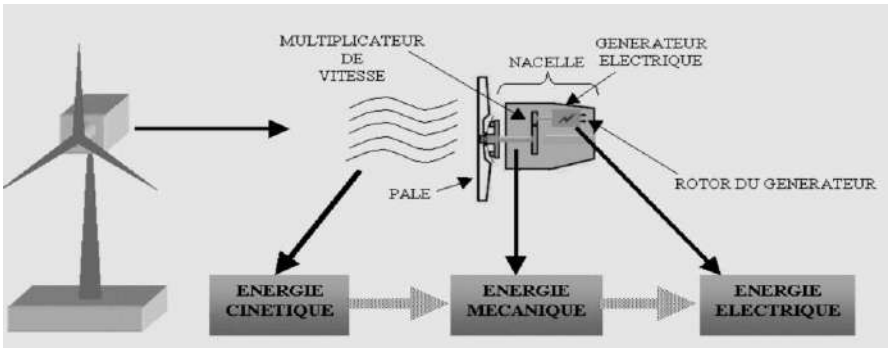


Figure I.23. Conversion de l'énergie éolienne [10].

I.3.2.5.Notions Théoriques sur L'aérogénérateur

I.3.2.5.1.Limite de Betz

La totalité de l'énergie cinétique de vent ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Le théorème de Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à 16 / 27, soit environ 59 % de l'énergie totale du vent. La notion de coefficient de puissance Cp peut maintenant être présentée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre Cp exprimé en fonction de la vitesse spécifique normalisée **λ.**

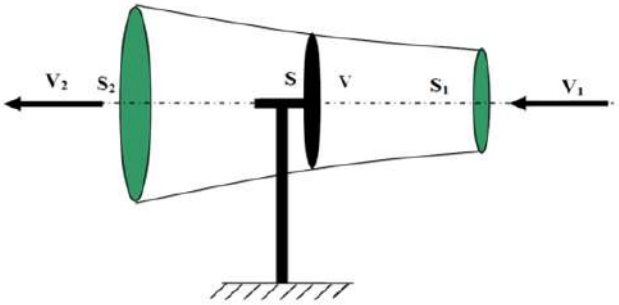


Figure I.24 .tube de courant autour d'une éolienne [8].

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant (Figure 1.23).

Avec:

V1 : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

V : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, de l'ordre de quelques m/s.

V2 : la vitesse du vent après prélèvement les pales de l'éolienne

Où : V1> V > V2 Sont parallèles à l'axe du rotor.

I.3.2.5.2.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] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3 \qquad \textbf{(I.3)}$$

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:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2}\rho C_P \pi R^2 V^3 \qquad \textbf{(I.4)}$$

Où :ρ=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 étant le rapport :

Cp = (puissance disponible sur l'arbre) / (puissance récupérable).

I.3.2.5.3.Couple Produit par L'éolienne

$$C = \frac{P_{turbine}}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2}\rho C_P \pi R^2 V^3}{\Omega} \quad \textbf{(I.5)}$$

Avec : **Ω** La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s].

I.3.2.5.4.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 :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad \textbf{(I.6)}$$

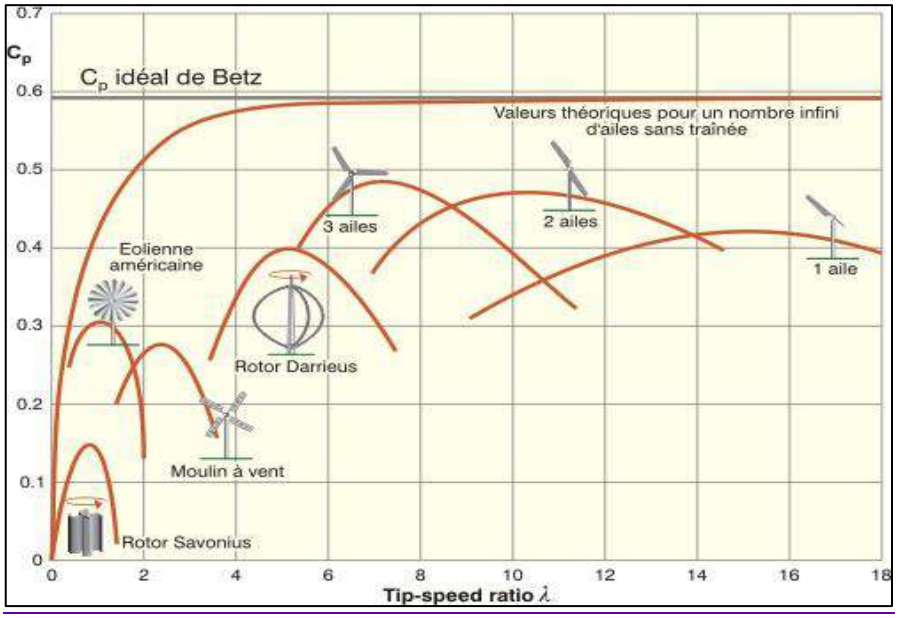


Figure I.25. CP en fonction de λ pour différents types d'éoliennes [20].

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.

I.3.2.6.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 machine synchrone à aimant permanent.

I.3.2.6.1.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 [15].

B. Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout 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 des convertisseurs de fréquence.

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 [20].

I.3.2.6.2.Machine synchrone

A. Générateur synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité [23]. 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.

B. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

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 [22].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, 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 qui est 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 une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [15].

Dans la configuration de la GSAP de la Fig. I.25, la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau 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 [15].

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) [15].

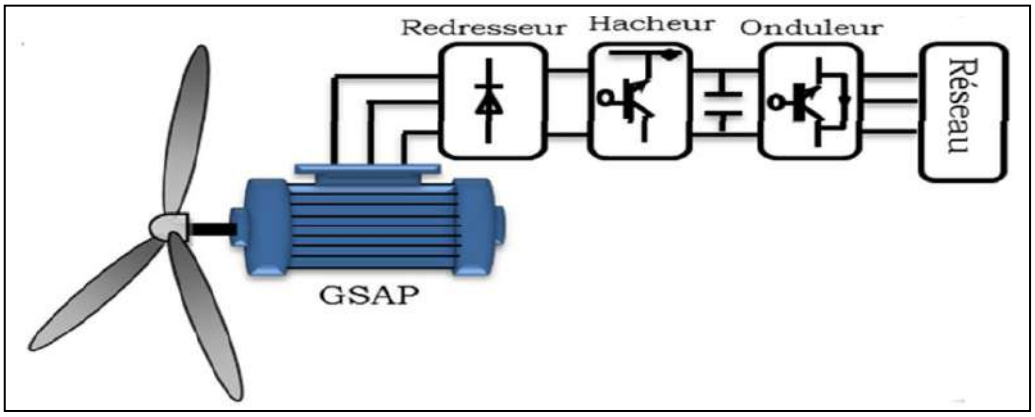


Figure I.26 .systèmes éoliens basés sur la GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI

I.3.2.7.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale Pn à partir d'une vitesse de vent nominale Vn. Pour des vitesses de vents supérieures à Vn, 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 Pn pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnâtes : Vd la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et VM la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement (figure 1.26) [5].

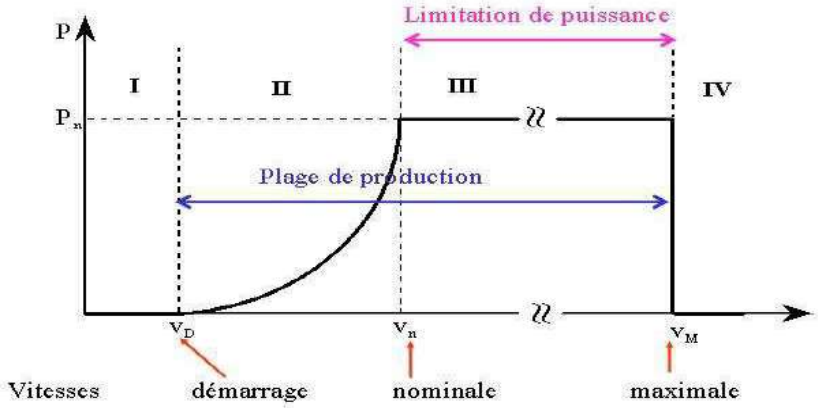


Figure I.27. Caractéristique puissance / vitesse du vent [14].

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [14] :

- La zone I : où Pt= 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.
- La zone III : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance Pturbinefournie reste sensiblement égale à Pn.
- 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 vitesses [4].

- 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 se créent 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 [14].

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités [4] :

- basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal.
- pas variable par la pression du vent (modèle Airwind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage).

I.3.2.8.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [3] [10]

I.3.2.8.1.Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant et propre.
- 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.
- 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.
- 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.

I.3.2.8.2.Inconvénients

- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie et de la nature stochastique du vent.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région et l'impact sur les parcours migratoires des oiseaux.
- 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.

I.3.3.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[1].

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 [8].



Figure I.28. Batterie au Plomb-acide

I.3.3.1.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 1.28).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 [4].

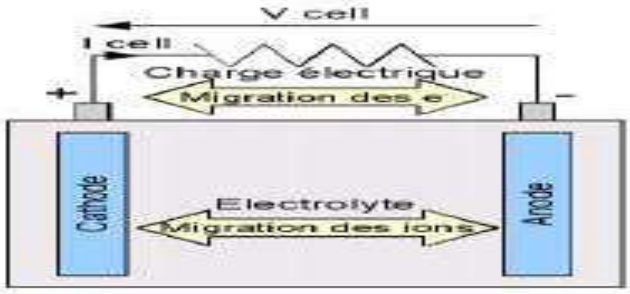


Figure I.29 . Principe de fonctionnement d'une batterie [23]

$$Pbo_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{Décharge}}{\overset{\text{Charge}}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + 2H_2O \qquad \textbf{(I.7)}$$

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 [23].

I.3.3.2.Caractéristiques des batteries

Les paramètres techniques les plus représentatifs identifiés d'un accumulateur sont les suivants [1]:

- **Capacité nominale:** c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah).
- **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.

I.3.4.Les convertisseurs statiques

I.3.4.1.Convertisseur CA/CC (redresseur)

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'un CA, ce sont des appareils relativement simples, pas chers et a bon rendement [8].

I.3.4.2.Convertisseur CC/CA (onduleur)

Les onduleurs réalisent la conversion CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement [11].

I.3.4.3.Convertisseur CC/CC (hacheur)

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée [11].

I.3.5.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 [24].

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[8][1].

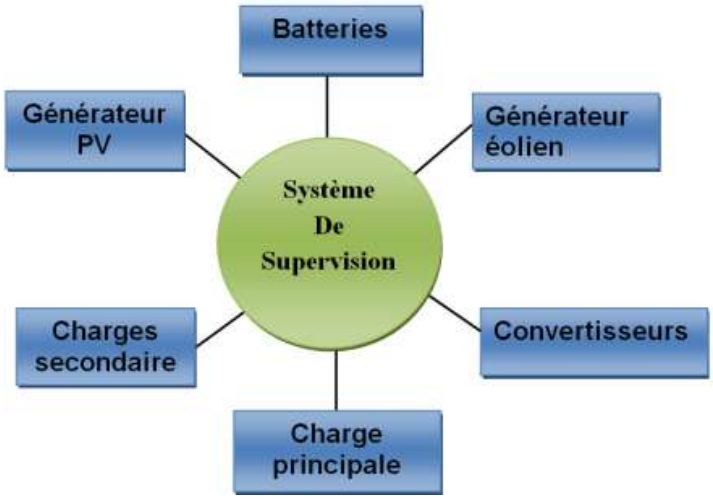


Figure I.30. Système de supervision [16].

I.4. Etat 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 la communauté internationale pour la lutte contre le réchauffement climatique et sa possession de l'un des plus grands gisements solaires au monde [25].

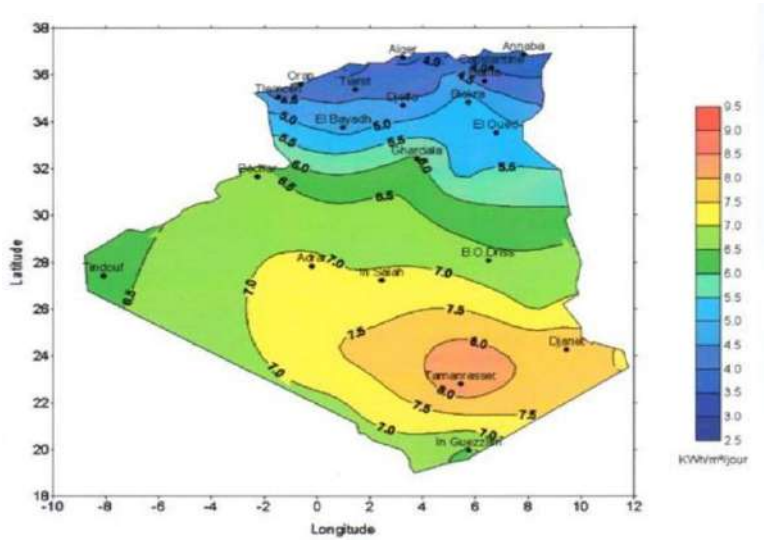


Figure I.31. Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie.

L'état algérien est lancer un programme <<TAFOUK 1>> d'une capacité de 15.000 MW à l'horizon 2035, dont 4000 MW d'ici 2024, sera mis en œuvre et plus de 630 MW seront réalisés a la

fin de 2020 (423 MW d'énergie photovoltaïque et 10MW d'énergie éolienne) [2].La réalisation de ces capacités permettra d'économiser près de 240 milliards de m3 de gaz naturel et d'éviter ainsi l'émission de 200 millions de tonnes de CO2 [26].

I.4.1.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. I-30[25].

I.4.2. Les gisements éoliens en Algérie

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 I-31.

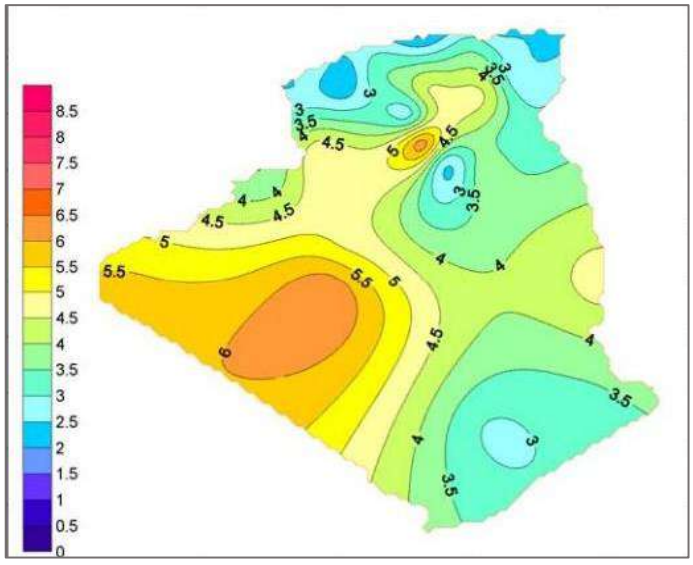


Figure I.32 . Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol [25].

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 montrent que 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 [25].

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 [25].

I.5. Généralités sur le soudage

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, c'est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base [25].

I.5.1.Procédés de soudage

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transfère d'énergie comme présenté dans la figure I.33.

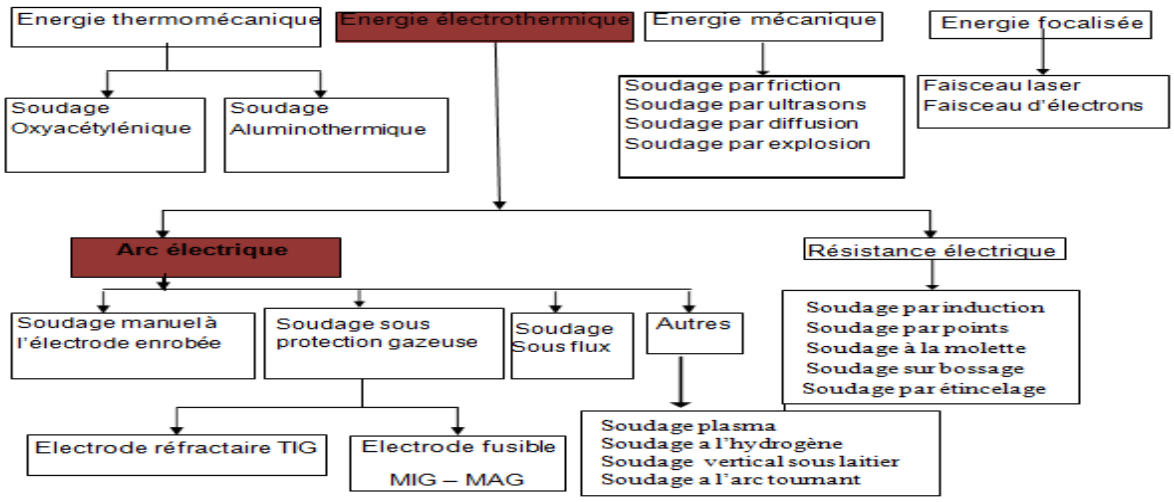


Figure I.33 . Classifications des procédés de soudage [28]

I.5.2.Soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur et produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode. Le contacte puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. Electrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder (Figure I.34).

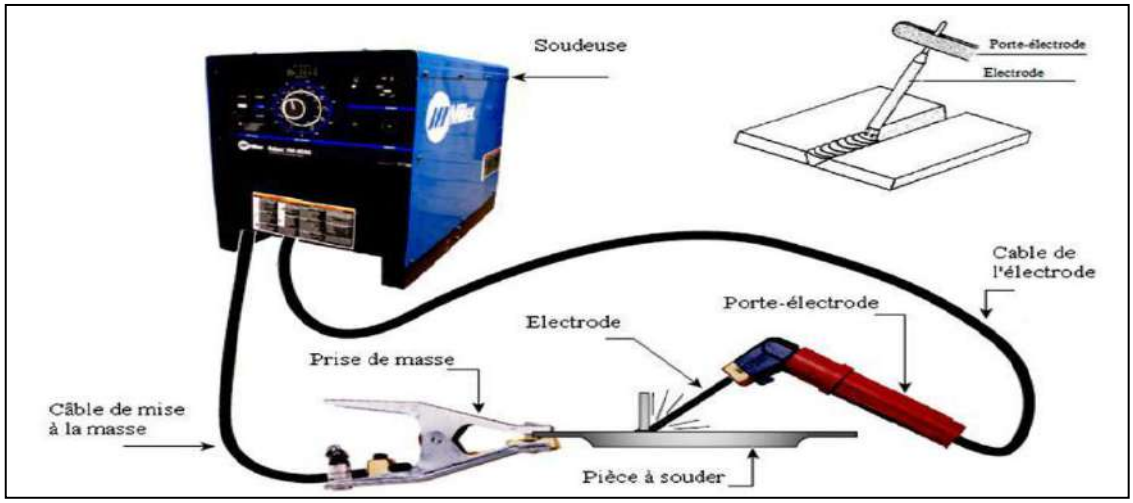


Figure I.34 . Principe de soudage à l'arc électrique [27].

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base, pour amorcer un arc il faut que le courant parcoure un circuit fermé d'une part la pièce et de l'autre l'électrode.

Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage avec électrode enrobées ;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG (Tungstène Inert Gas) ;
- Le soudage automatique sous flux ;
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG (Métal Inert Gas) ou MAG (Métal Active Gas).

I.5.3.Les paramètres de soudage

I.5.3.1.L'intensité du courant de soudage

On appelle intensité du courant de soudage, la quantité d'électricité qui traverse l'électrode et la pièce lorsque l'arc est amorcé, elle est donnée par la formule :

Intensité = (Ø de l'électrode –1) x50. **(I.8)**

Avec Ø= le diamètre de l'électrode.

I.5.3.2. La tension du soudage

Pour pouvoir amorcer un arc, la tension entre l'électrode et la pièce doit atteindre une certaine valeur (tension d'amorçage: entre 45 et 100 V selon l'électrode). Lorsque l'arc est amorcé, la tension existant entre l'électrode et la pièce est beaucoup plus faible (tension d'arc: 15 à 45 V). Pour une même électrode, cette tension est d'autant plus faible que l'arc est tenu plus court, elle donné par la formule [19]:

Tension= (0.04 x Intensité) + 21 **(I.9)**

I.5.3.3.Energie nominale et vitesse de soudage

L'énergie de soudage E, ramenée à une unité de longueur, est déterminée par l'équation :

Elle s'exprime en j/cm avec :

En = U.I / V **(I.10)**

La vitesse de soudage est la vitesse d'avancement de l'électrode le long de la ligne â soudé [29].

I.5.3.4. Le type de courant de soudage : Alternatif (CA) ou continu (DC)

- Le courant alternatif est le plus fréquent car délivré par des postes à souder à transformateurs statiques. Le courant alternatif permet d'utiliser la presque totalité des électrodes, mais n'est pas utilisable avec toutes les électrodes ni tous les procédés de soudure à l'arc.
- Le courant continu est généralement celui débité par les postes de soudure de nouvelle génération intégrant une électronique de régulation de puissance « poste à souder onduleur ». Le courant continu permet de fondre tous les types d'électrodes.

I.5.4. Poste à souder onduleur

Le soudage à l'arc nécessite une tension assez faible, mais une importante intensité de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'ampères.

Le poste à souder onduleur est un transformateur électronique basse tension (230-400 volts) vers très basse tension régulant en continu la puissance la plus adaptée en lieu et place du transformateur basique du poste à souder classique « shunt » [44].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les systèmes de production d'énergie hybride. Dans un premier lieu, nous avons présenté la définition d'un système hybride avec les avantages et les inconvénients puis les différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes. Puis nous avons donné une étude descriptive des sources d'énergie qui composent ces systèmes, notamment le système photovoltaïque, le système éolien, les batteries et les convertisseurs. Ensuit, nous avons présenté le développement des énergies renouvelables en Algérie**.** Finalement, la dernière section de ce chapitre a été consacrée à un état de l'art sur le soudage à arc. Ce chapitre est considéré comme une introduction détaillée de notre travail, afin 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.

II. Chapitre 2 : modélisation des composants du SEH

II.1. Introduction :

La modélisation est un moyen de représentation d'une fonction ou de processus technologique par une forme mathématique, elle a pour but de disposer de modèles suffisamment fiables afin d'effectuer une étude d'optimisation, du dimensionnement et de le simuler sous un logiciel mathématique (dans notre cas Matlab_simulink) en respectant une certaine contrainte donnée [11].

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation des composants du système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage, en ce proposons l'élaboration des modèles mathématiques pour les deux systèmes de production d'énergies, une modélisation du système de stockage, particulièrement les batteries et les convertisseurs statiques qui a pour rôle d'adapter l'énergie d'entrée a la charge en sortie.

II.2. Outils de modélisation

Le système d'énergie hybride autonome proposé est composé de la combinaison de deux sources d'énergie : photovoltaïque, éolienne plus le système de stockage. Tous ces éléments sont connectés à un bus DC, afin d'alimenté un poste de soudage a arc et des charges supplémentaires. Selon la figure (II.1), nous avons :

- Le système PV se composant 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 éolien formé par une turbine éolienne à axe horizontal, une machine synchrone à aimants permanents, un pont de diodes qui assure la conversion électrique AC/DC et un hacheur du type élévateur qui permet d'obtenir le maximum de puissance de l'éolien grâce à l'utilisation d'un algorithme MPPT.
- 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.

Une modélisation de chaque composant est décrite ci-dessous.

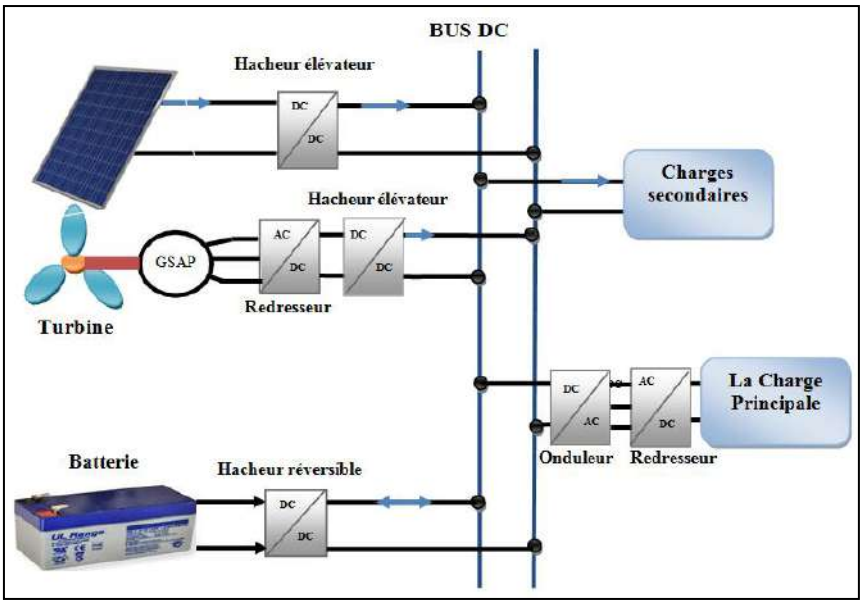


Figure II.1. Architecture du système d'énergie hybride étudié

II.3. Modélisation de la chaine de production photovoltaïque

II.3.1.Modélisation d'une cellule photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques, ont été développés dans la littérature pour identifier le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque.

Nous avons choisi le modèle à une diode et cinq paramètres, qui est le plus utilisé. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent représenté sur la figure (II.2).Ce modèle fait intervenir une source de courant qui génère un courant Iph proportionnel à l'éclairement, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule traversée par le courant Id, complété par une résistance série *Rs*et une autre parallèle *Rp* pour les pertes [1].

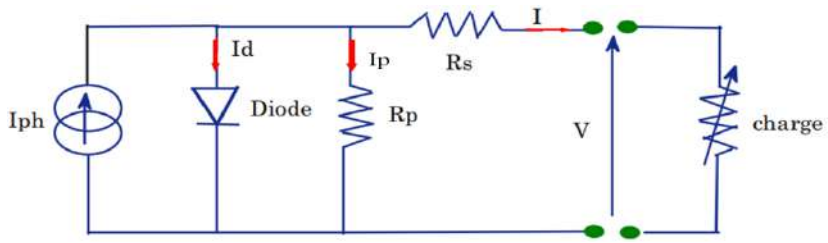


Figure II.2. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \qquad \textbf{(II-1)}$$

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 [°c].

Le photo-courantI_{ph}, est donné par la formule suivante :

$$I_{ph} = \left[I_{ph,n} + K_i(T - T_n)\right]\frac{G}{G_n} \quad \textbf{(II-2)}$$

Le courant de jonction $I_d$est donné par :

$$I_d = I_{sat}(\exp(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}) - 1) \quad \textbf{(II-3)}$$

Le courant dans la résistance Rp est donné par :

$$I_p = \frac{V+I\cdot R_s}{R_p} \quad \textbf{(II-4)}$$

L'équation caractéristique d'une cellule PV est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{sat}\left(\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\mathrm{n.k \cdot T}}\right) - 1\right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad \textbf{(II-5)}$$

Où :

I : Le courant de cellule [A], V : La tension de cellule [V], Iph : Le photo-courant de la cellule [A].

Rs : La résistance série de la cellule [Ω], Rp : La résistance shunt de la cellule [Ω].

T : La température absolue de la cellule [°c], q : La charge de l'électron e =1.6 *10^{-19} [C].

Isat : Le courant de saturation [A], k : Constante de Boltzmann (1,38*10-23 J/K)

n : Le facteur d'idéalité de la diode.

II.3.2.Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique (II.5). Les plus usuels sont les suivantes [30]:

II.3.2.1.Courant de court-circuit, ICC

C'est le courant pour lequel la tension aux V=0. Dans le cas idéal (Rs nulle et Rp infinie), ce courant se confond avec le photo-courant Iph dans le cas contraire en annulant V dans l'équation (II-5), on obtient **:**

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}[e^{\frac{q(Icc.Rs)}{nKT}} - 1] - \frac{Icc.Rs}{Rp} \quad \textbf{(II-6)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme$I_{sat}[e^{\frac{q(Icc.Rs)}{nKT}} - 1]$ devant I_{ph}.

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{Iph}{(1+\frac{Rs}{Rp})} \quad \textbf{(II-7)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement Icc=Iph).

II.3.2.2.Tension de circuit ouvert :

C'est la tension V_{C0}pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul.

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \cdot (e^{q(\frac{V+R_S \cdot I}{n \cdot K \cdot T})} - 1) - \frac{V_{C0}}{R_p} \quad \textbf{(II-8)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{C0} = \frac{q}{n \cdot K \cdot T} * \ln(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1) \quad \textbf{(II-9)}$$

II.3.2.3.Puissance maximale

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale Vpm et à une intensité maximale Ipm. Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées standard (une température de 25° et un éclairement de 1000 w/m2), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.

II.3.2.4.Facteur de forme

C'est un facteur de performance des cellules solaires ; plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures. Il compare la puissance maximale délivrée (Pmax) au produit de court-circuit (Icc) et de la tension à circuit- ouvert (V_{c0}).

$$FF = \frac{P_m}{V_{c0} \cdot I_{cc}} = \frac{I_{pm.} \cdot V_{pm}}{V_{c0} \cdot I_{cc}} \quad \textbf{(II-10)}$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

II.3.2.5.Le rendement :

Le rendementη, 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}.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_{pm} \cdot V_{pm}}{A.G_a} \quad \textbf{(II-11)}$$

P_{in}: Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque (W)

G_a : Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque (W/m2),

A: Surface totale de la cellule photovoltaïque (m2).

Ce paramètre (η) reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.3.3.Caractéristiques électriques d'un panneau 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.

II.3.3.1.Caractéristique Courant-Tension

La figure (II.3) représente la courbe I = f(V) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions d'irradiation de 1000 W/m^2et une température de 25°C.

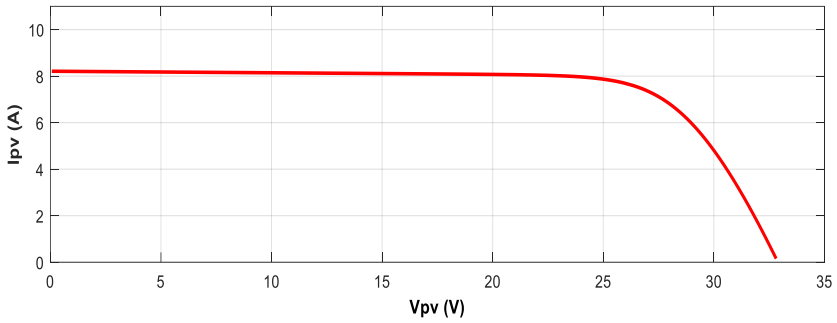


Figure II.3. Caractéristique Ipv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque

II.3.3.2.Caractéristique puissance –tension

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement standard (éclairement de 1000 W/m^2 température de 25 °C), la puissance électrique Ppv□ a pour expression :

Ppv□□= Vpv * Ipv **(II-12)**

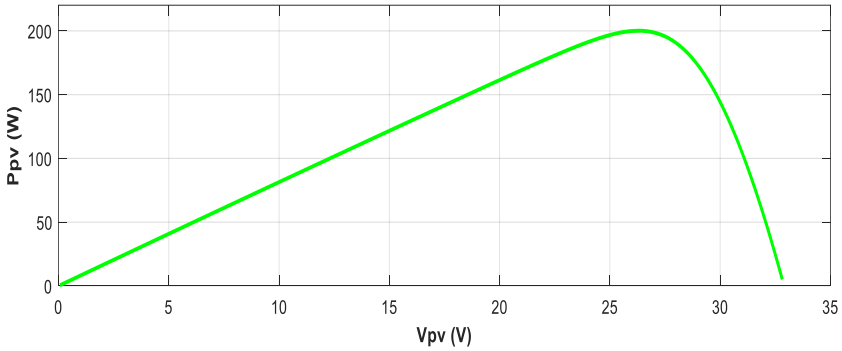


Figure II.4 . Courbe Ppv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque.

II.3.3.3.Influence de la température

La figure (II.5) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement d'un module photovoltaïque.

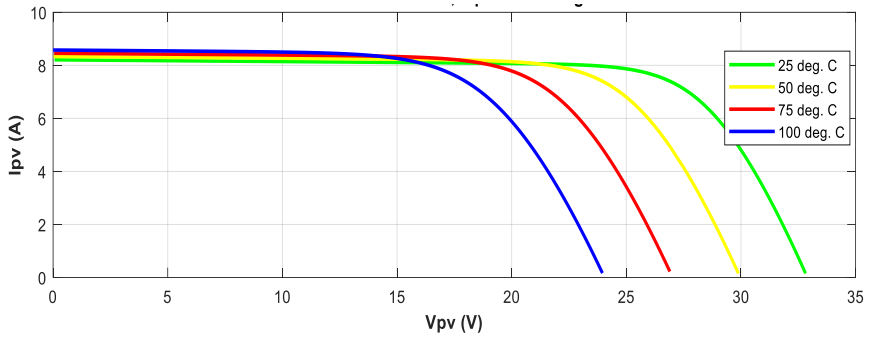


Figure II.5 . Influence de la température sur la caractéristique I=f(V).

On remarque que la température influe peu sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

La figure (II.6) illustre la variation de la puissance délivrée par un module photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température.

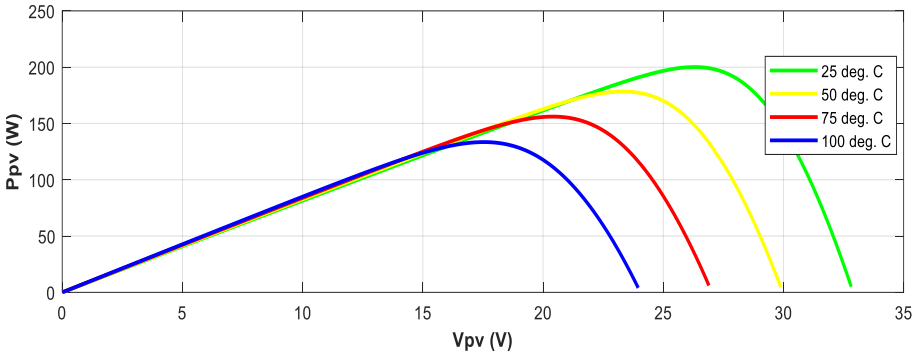


Figure II.6 . Influence de la température sur la caractéristique P=f(V).

On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert a baissé assez fortement lorsque la température augmente. Par contre, le point de puissance maximale de chaque courbe diminue lorsque la température augmente.

II.3.3.4.Influence de l'éclairement

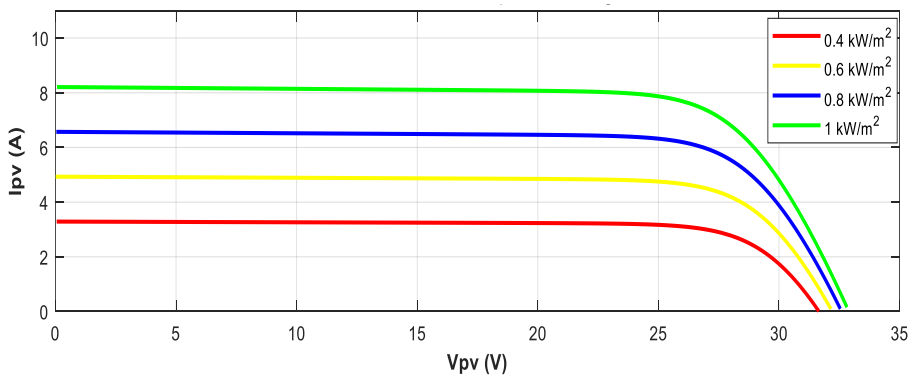


Figure II.7 . Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V).

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans la même proportion, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

La figure (II.8) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement.

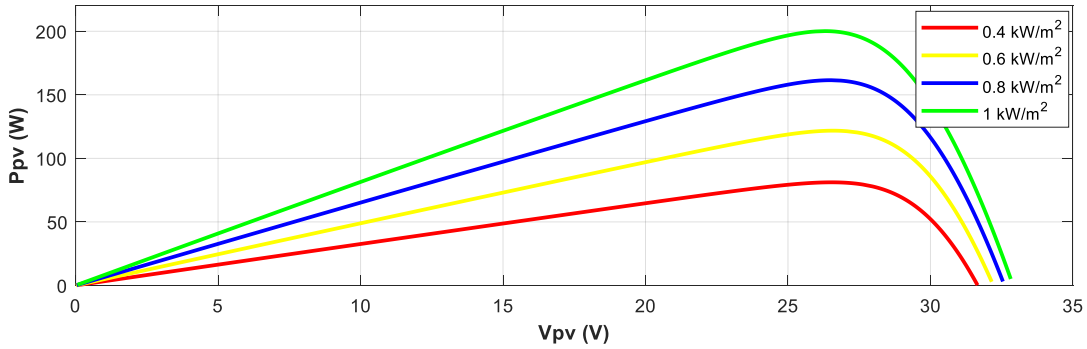


Figure II.8 . Influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

II.3.4.Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST)

Pour que 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. Son circuit électrique est présenté dans la figure (II.9) [1].

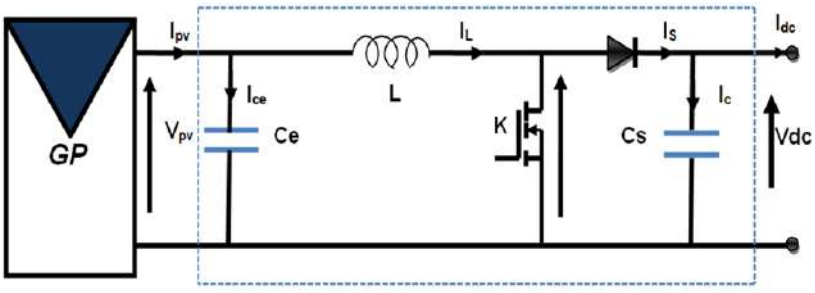


Figure II.9 . Schéma de principe d'un convertisseur survolteur

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

$$\begin{cases} 0 = C\dfrac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \\ V_{pv} = L\dfrac{dI_L}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(II-13)}$$

Pour la deuxième période : *K* est ouvert

$$\begin{cases} V_{pv} = L\dfrac{dI_L}{dt} + V_{dc} \\ I_L = C\dfrac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \end{cases} \quad \textbf{(II-14)}$$

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

$$\begin{cases} \dfrac{dI_L}{dt} = \dfrac{V_{PV}}{L} - (1-D)\dfrac{V_{dc}}{L} \\ \dfrac{dV_{dc}}{dt} = -\dfrac{I_{dc}}{C} + (1-D)\dfrac{I_L}{C} \end{cases} \quad \textbf{(II-15)}$$

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 :

$$V_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad \textbf{(II-16)}$$

Et celle du courant :

$$I_{dc} = (1-\alpha) I_L \quad \textbf{(II-17)}$$

II.4. Modélisation de la chaine de production éolienne

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pâles, du système mécanique de transmission, ainsi que du générateur électrique.

Le schéma synoptique étudié dans ce travail est présenté sur la figure (II.1). Il s'agit d'une turbine éolienne, d'une génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur et un hacheur survolteur.

II.4.1.Modélisation de la vitesse de vent

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. C'est donc une variable importante à modéliser.

Elle est généralement représentée par deux composantes :

- une composante turbulente du vent $v_T(t)$est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- une composante lente vmoy ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné [18].

$$v(t) = vmoy + v_T(t) \quad \textbf{(II-18)}$$

II.4.2.Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure [15].

L'équation (II.19) représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho . \pi R^2 V^3 \quad \textbf{(II-19)}$$

Où :

ρ = 1,23 kg/m3 : masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression ; V est la vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérée qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance CP) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{\text{Turbine}} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad \textbf{(II-20)}$$

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

$$\lambda = \frac{R\Omega_{\text{Turbine}}}{V} \quad \textbf{(II-21)}$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine *en (N.m)* est défini par :

$$C_{ar} = \frac{P_{Turbine}}{\Omega_T} \quad \textbf{(II-22)}$$

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

$$C_p = f(\lambda,\beta) = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4\right)\exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_1}\right) + C_6\lambda \quad \textbf{(II-23)}$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \textbf{(II-24)}$$

Avec :

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

β: Angle de calage ; R : longueur de la pale ; Ω_T: vitesse mécanique de la turbine en rad/s.

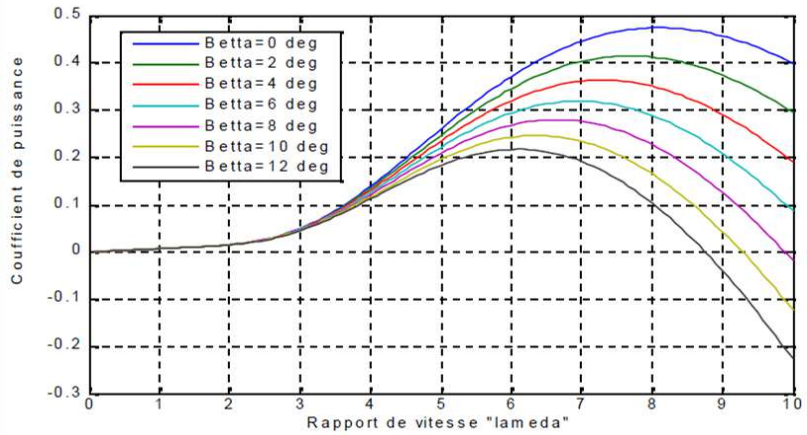


Figure II.10. Caractéristique du coefficient Cp (λ,β) pour plusieurs valeurs de β

Sur la Figure (II.10), nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda = 8{,}1, C_{pmax} = 0.48, \beta = 0°$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance $C_p$et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

II.4.3.Modélisation du Multiplicateur :

Le multiplicateur est l'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Il a pour but de règle la vitesse de la turbine Ω_t assez lente à la vitesse de la génératriceΩ_m. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain [31] :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{K} \quad \textbf{(II-25)}$$

$$C_{\text{mec}} = \frac{1}{K}C_{\text{aer}} \quad \textbf{(II-26)}$$

Avec :

K : Le gain du multiplicateur.

C_{mec} : Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur.

C_{aer}□ : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent..

Ω_{mec} : La vitesse mécanique de la génératrice.

Ω_t : La vitesse de la turbine.

II.4.4.Modélisation de l'Arbre Mécanique :

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [31]:

$$j\frac{d\Omega_{mes}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \qquad \textbf{(II-27)}$$

Où :

j = inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m2).

f = coefficient de frottement visqueux.

C_T = (Cem +C_{mec}) = couple totale de l'éolienne (N.m).

Cem = couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple Cem a un signe négatif.

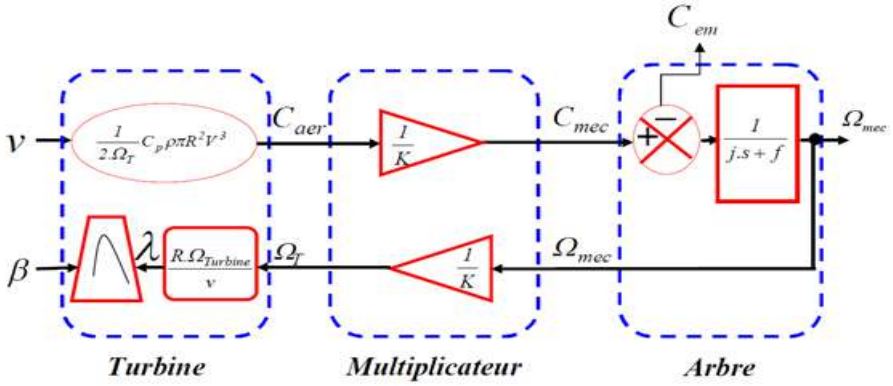


Figure II.11. Le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.

II.4.5.Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone a aimant permanent est intéressante surtout pour les applications isolées et autonomes qui est notre cas. L'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses simplificatrices [14] :

- La bobine de stator connectée en étoile, neutre dans l'air pour éliminer l'élément homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée, elle aboutit à l'expression des flux magnétiques en tant que fonctions linéaires des courants des phases.
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis, par courants de Foucault et l'effet de peau sont négligées.

II.4.5.1.Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a, b, c) :

La machine synchrone à aimants permanents peut être modélisée par trois équations électriques et une seule équation mécanique, les tensions aux bornes des trois phases s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes [32].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [Rs] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-28)}$$

Où:

$[v_a v_b v_c]^T$: Vecteur tension déphases statoriques.

$[i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courants de phases statoriques.

$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

Rs : la résistance d'une phase d'enroulement statoriques.

Les flux totauxφabcsont exprimés par :

$$[\varphi_{abc}] = [L][i_{abc}] + [\Psi_{fabc}] \quad \textbf{(II-29)}$$

Tel que:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_{ss} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-30)}$$

Lss et Mss : représentant respectivement l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.

En remplacent les relations (I.30) et (I.29) dans, respectivement la relation (I.28), nous obtenons l'expression suivante :

$$[v_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + [L]\frac{d}{dt}[i_{abc}] + [\Psi_{abc}] \quad \textbf{(II-31)}$$

II.4.5.2.Modèle de la MSAP dans le repère de Park :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de 2π/3 en deux bobines fictives équivalentes déphasées de π/2 et situées sur le rotor (Figure II.12) [32] .

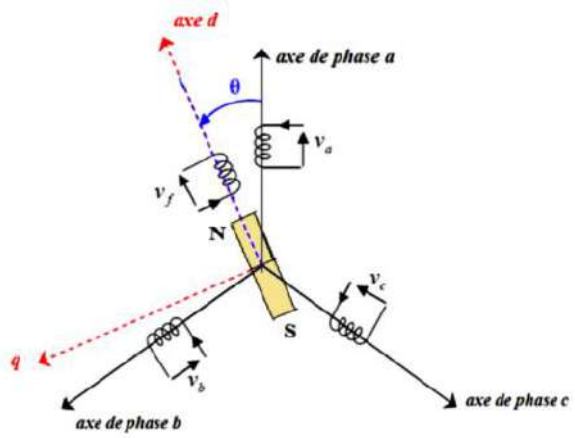


Figure II.12 . Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

La transformation de Park permet de transformer un système triphasé (a, b, c) au système équivalent biphasés généralisé (d, q), définie par la matrice [p(θ)].

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)][X_{abc}] \quad \textbf{(II-32)}$$

Où X peut-être un courant, une tension ou un flux et θ représente la position du rotor. Les termes Xd , Xq représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques .la matrice de transformation [p(θ)]est donnée par :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{2}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-33)}$$

Dont la matrice inverse [p(θ) −1] :

$$[p(\theta)^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{2}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-34)}$$

En appliquant la transformation (II.32) au système (II.31), on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \dfrac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_q \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \dfrac{di_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_d \end{cases} \quad \textbf{(II-35)}$$

Avec:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_d i_{ds} + \Psi_f \\ \varphi_{qs} = L_q i_{qs} \\ \omega_r = p\Omega_m \end{cases} \quad \textbf{(II-36)}$$

Où:

vds, vqs : représentent respectivement la vectrice tension statoriques d'axes d et q.

ωr : vitesse électrique de rotation du rotor.

p : nombre de paires de pôles.

Ψf : flux induit par les aimants.

Rs : résistance d'une phase statoriques.

Lqs, Ld s: représentent respectivement les inductances statoriques d'axes d et q.

La substitution de (II.36) dans (II.35) donne :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \dfrac{di_{ds}}{dt} - p\Omega_m L_q i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \dfrac{di_{qs}}{dt} + p\Omega_m L_d i_{ds} + p\Omega_m \Psi_f \end{cases} \quad \textbf{(II-37)}$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \dfrac{di_{ds}}{dt} + p\Omega_m L_q i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \dfrac{di_{qs}}{dt} - p\Omega_m L_d i_{ds} + p\Omega_m \Psi_f \end{cases} \quad \textbf{(II-38)}$$

II.4.5.3.Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par:

$$c_{em} = \frac{3}{2} p(-\varphi_{ds} i_{qs} + \varphi_{qs} i_{ds}) \quad \textbf{(II-39)}$$

En remplaçant les flux par leurs expressions, on aura:

$$c_{em} = \frac{3}{2} p[(L_q - L_d) i_{ds} i_{qs} + \Psi_f i_{qs}] \quad \textbf{(II.40)}$$

II.4.5.4.Equations mécaniques :

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

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = c_m - c_{em} - f_m * \Omega_m \quad \textbf{(II.41)}$$

Avec :

c_m :Le Couple moteur appliqué sur la génératrice.

II.4.6.Modélisation du redresseur PD3 à diodes

Le redresseur est un convertisseur statique AC/DC, comme le montre le schéma ci-dessous [20] :

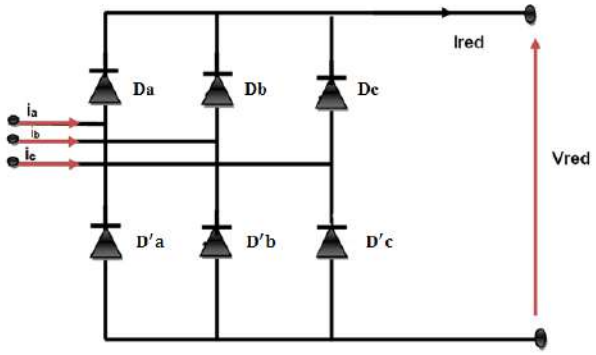


Figure II.13. Schéma du redresseur PD3 à diodes

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 :

$$\begin{aligned} V_a(t) &= V_{max}\sin(wt) \\ V_b(t) &= V_{max}\sin\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) &= V_{max}\sin(wt - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad \textbf{(II.42)}$$

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque $D_a$conduit, l'une des deux diodes $D_b^{'}$et $D_c^{'}$conduit également. Il vient que conduit lorsque $v_a$est plus positive que v_b et v_c, ou encore :

$$V_a = \text{Max}\,(V_j); j = a, b, c \quad \textbf{(II.43)}$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$\begin{aligned} &D_i\text{conduit si}V_i = \text{Max}\,(V_j); j = a, b, c; i = a, b, c \\ &D_i^{'}\text{conduit si}\ V_i = \text{Min}\,(V_j); j = a, b, c; i = a, b, c \end{aligned} \quad \textbf{(II.44)}$$

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

$$U_{red}(t) = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j); j = a, b, c \quad \textbf{(II.45)}$$

Sa valeur moyenne est donnée par :

$$(U_{red})_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{\max} \quad \textbf{(II.46)}$$

II.5. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb acide. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances.

Notre choix s'est porté sur deux modèles dans le but de choisir celui qui convient notre étude [33] :

II.5.1.Modèle R-C

Le modèle R-C comprend une fem $E0$ modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ($Cb\text{att}$) et une résistance interne (Rs) [33].

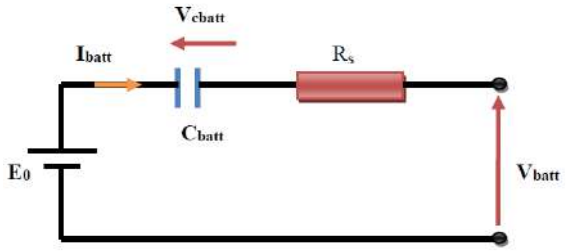


Figure II.14. Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R_s{}^* I_{\text{batt}} - V_{\text{cbatt}} \quad \textbf{(II.47)}$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{\text{batt}}} \quad \textbf{(II.48)}$$

Avec :

$\boldsymbol{Cbatt}$: La capacité (Ah) normale de la batterie et Qd :la quantité de charge manquante par rapport à $Cbatt$.

II.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 :

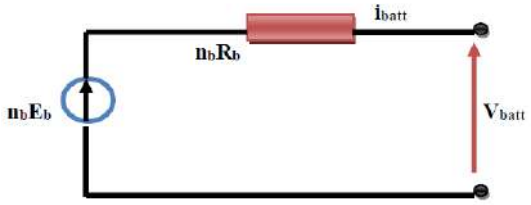


Figure II.15. Modèle CIEMAT de la batterie.

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie $Cbatt$que peut restituer la batterie, en fonction du courant moyen de décharge I_{batt}. Son expression est établie à partir du courant I_{10}Correspondant au régime de fonctionnement c_{10}[34] [35].

$$ED\,\frac{c_{\text{batt}}}{c_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67.\left(\frac{I_{\text{batt}}}{I_{10}}\right)^{0.9}} \cdot (1 + 0.005.\Delta T) \qquad \textbf{(II.49)}$$

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{batt} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_b \cdot I_{batt} \qquad \textbf{(II.50)}$$

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

- La tension en décharge :

$$V_{\text{batt-dech}} = n_b \cdot [1.965 + 0.12.EDC] - n_b.\frac{|i_{\text{batt}}|}{c_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |i_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{(1 - EDC)^{1.5}} + 0.02\right) \cdot (1 - 0.007.\Delta T) \qquad \textbf{(II.51)}$$

- La tension en charge :

$$V_{\text{batt-char}} = n_b.[2 + 0.16.EDC] + n_b.\frac{|i_{\text{batt}}|}{c_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1 + |i_{\text{batt}}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036\right) \cdot (1 - 0.025.\Delta T) \qquad \textbf{(II.52)}$$

II.5.3.Modélisation du hacheur réversible en courant

Dans le cas du hacheur utilisé pour réaliser la charge et la décharge de la batterie, le transfert de puissance (courant) doit être réversible. Son schéma électrique est donné par la figure (II-16).

Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme convertisseur élévateur (boost) pendant la décharge de la batterie et comme convertisseur abaisseur (Buck) pendant la charge de la batterie. Dans les deux modes (charge et décharge), le convertisseur bidirectionnel régule la tension du bus DC et contrôle le flux de puissance [25].

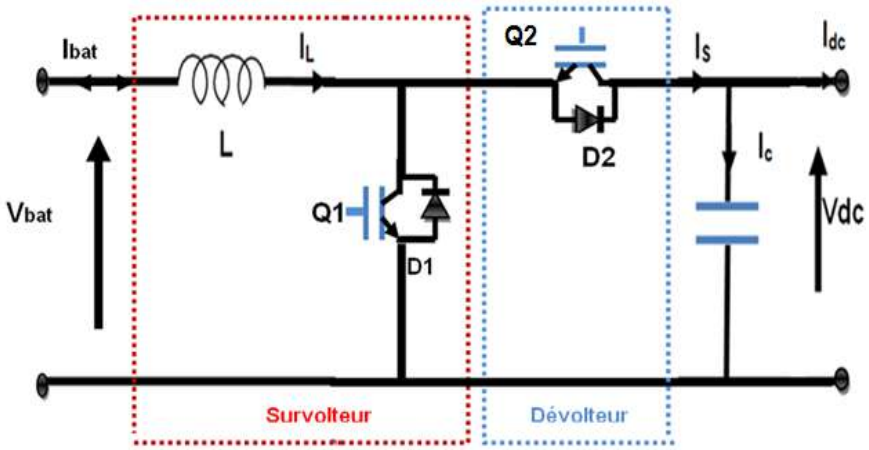


Figure II.16. Hacheur réversible en courant

ÀnoterquelacommandedesinterrupteursQ1etQ2estréaliséesimultanémentavecdeuxsignaux (rapports cycliques) complémentaires D et 1− D. Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équations (II.53) [37].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L}[v_{bat} - D\, v_{dc}] \\ \frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}[D\, I_L - I_{dc}] \end{cases} \quad \textbf{(II.53)}$$

II.6. Modélisation du bus continu

Généralement dans la modélisation, le bus continu est considéré comme une capacité. Une fois tous les modèles élémentaires sont décrits, nous avons effectué le couplage des sources selon la configuration à bus continu comme le montre la figure (II.17) [1].

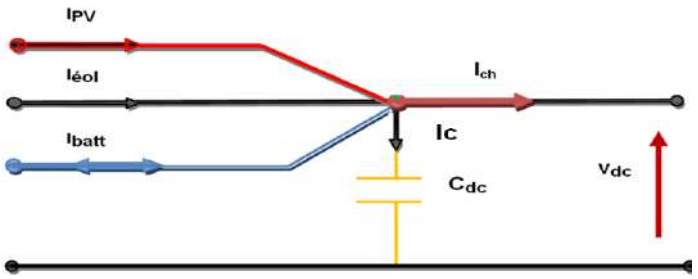


Figure II.17. Modèle du bus continu

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_c = C\frac{dV_{dc}}{dt} \quad \textbf{(II.54)}$$

$$I_c = I_{pv} + I_{eol} \pm I_{batt} - I_{ch} \quad \textbf{(II.55)}$$

Où :Ipv :le courant du système photovoltaïque, Iéol :le courant du système éolien, Ibatt :le courant de la batterie, Ich : est le courant de la charge, Ic: Courant qui traverse la capacité.

II.7.Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO**.** Le schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux est illustré par la figure II-18[1].

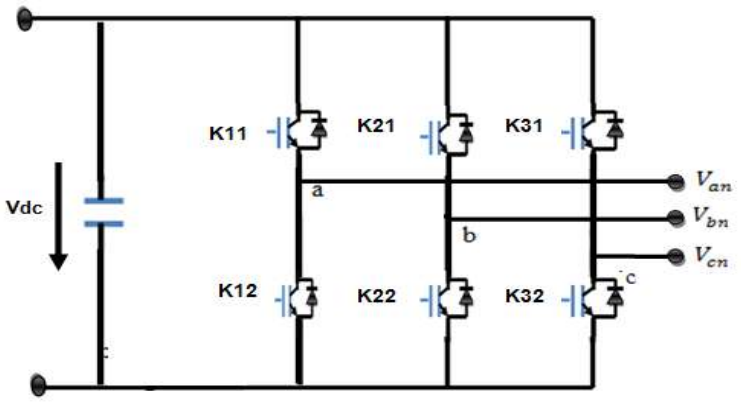


Figure II.18. Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Soit « **n** » le point neutre du côté alternatif et « o » le point fictif .Nous avons supposé que la charge est équilibrée($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$), les tensions de phase de la charge (Van, Vbn et Vcn) sont données par :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{\mathrm{co}}) \end{cases} \quad \textbf{(II.56)}$$

Soit S_i l'état de l'interrupteur K*i*, il est donné par:

- S_i= 1 lorsque l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert,
- S_i= 0 lorsque l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions, nous pouvons écrire les tensions *Vio*en fonction des signaux de commande Si (i = a, b, c)et entenant compte du point fictif "**o**"représenté par :

$$V_{io} = V_{dc}(S_i - \frac{1}{2}) \qquad \textbf{II.57)}$$

L'utilisation de l'expression (II.58) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{an} \end{bmatrix} = \frac{V_{ds}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \qquad \textbf{II.58)}$$

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté la modélisation d'un système hybride constitué par un générateur PV, un générateur éolien, un système de stockage (batterie du type plomb-acide) et des convertisseurs pour adapter les sources avec la charge. Tous ces éléments sont reliés à travers un bus continu. Les modèles des convertisseurs électriques élaborés dans ce chapitre seront utilisés pour commander et optimiser l'énergie produite par les sources photovoltaïque et éolienne.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande permettant le contrôle de tous les sous-systèmes, ainsi que l'optimisation de leurs énergies produites.

III.Chapitre 3 : commande et simulation d'un SEH

III.1. Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons établi les modèles mathématiques du système multi-source : PV, éolien, batterie, plus les convertisseurs statiques. Dans ce chapitre, nous allons synthétiser les commandes nécessaires et présenter les résultats obtenus après la simulation de chaque composant de ce système hybride autonome.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : Dans une première partie, nous devons maximiser la production des sources d'ER (PV et éolien) en appliquant les algorithmes MPPT. 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. Enfin, nous terminerons cette partie par la régulation de courant du poste onduleur.

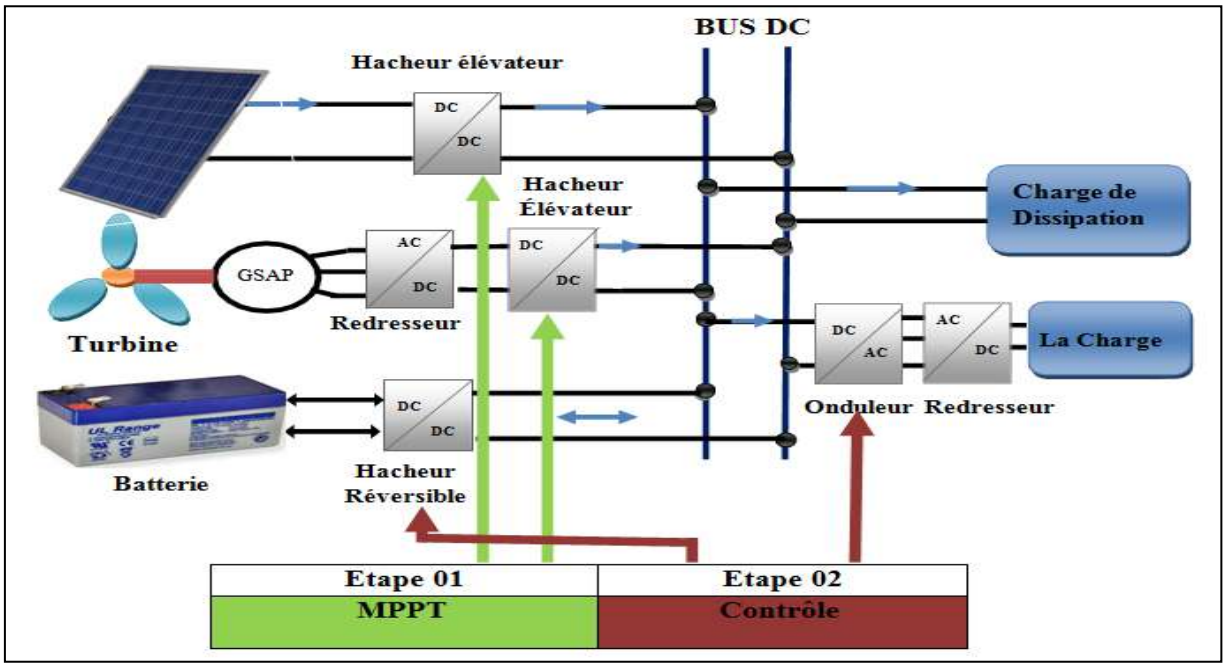


Figure.III.1. Schéma du SEH global

III.2. Description des algorithmes MPPT

Pour maximiser la production des sources d'ER (PV et éolien), nous devons appliquer à chacune, un algorithme de suivi du point de puissance maximale, couramment nommé MPPT.

Par définition, la commande MPPT est une stratégie d'optimisation, elle consiste à la recherche du point de fonctionnement maximal du système et le faire fonctionner dans le voisinage de ce point [3].

III.2.1.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 motive les chercheurs à mettre au point un contrôleur MPPT afin d'extraire le maximum de la puissance du système PV [1].

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 .III.2.

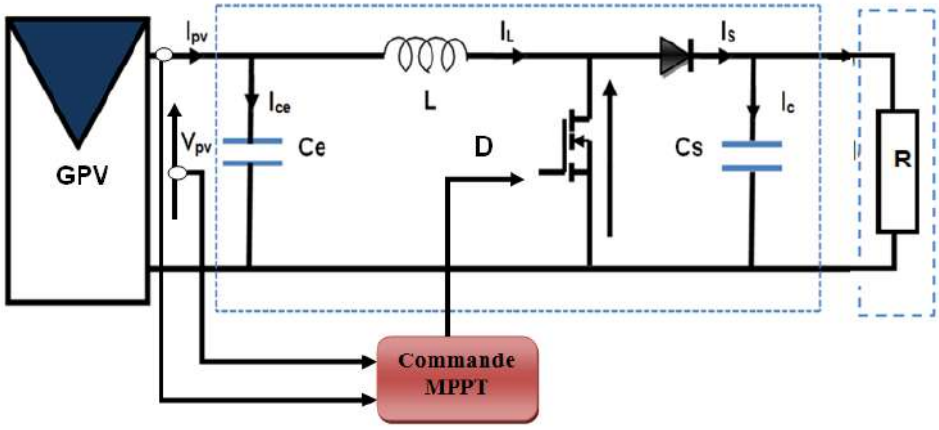


Figure III.2. Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT

La littérature est riche par diverses techniques MPPT, tels que Perturbation et Observation (P&O), Conductance Incrémental et la logique floue. Ces méthodes varient selon leur principe de fonctionnement, leur précision ainsi que leur rapidité de recherche. Pour optimiser l'énergie du système PV, deux algorithmes MPPT sont développés et exploités dans le présent travail, à savoir : Perturbation et Observation, et Logique Floue [38][1].

III.2.1.1.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 [1]. Comme l'illustre la figure .III.3.on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance Ppv, 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 [39].

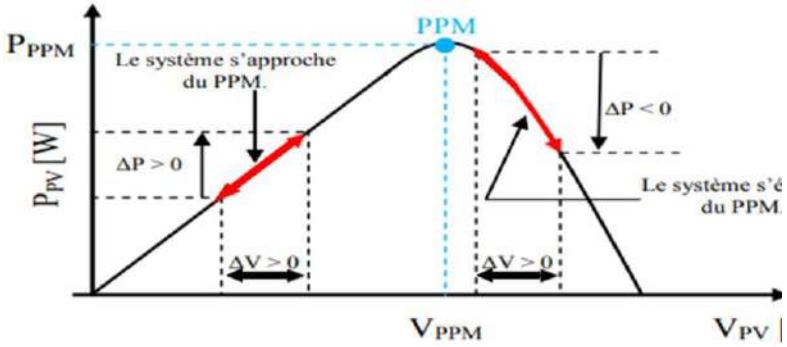


Figure.III.3. Principe de la MPPT avec la méthode P&O.

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].

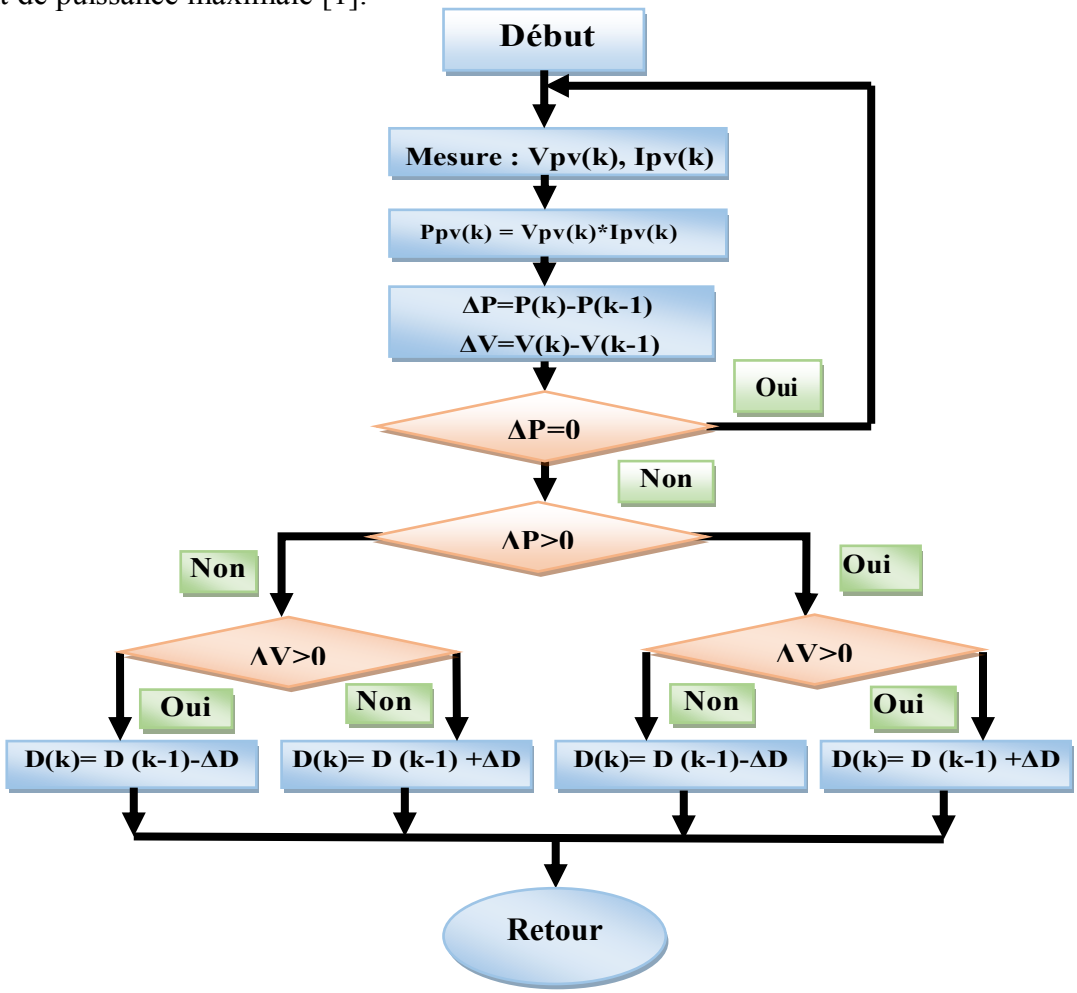


Figure.III.4. Organigramme de la méthode perturbation et observation (PO).

La figure III.4, 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.

III.2.1.2.Méthode logique floue

L'utilisation de la commande par logique floue offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer, elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou peut se réaliser en trois étapes : La fuzzification , l'inférence et la défuzzification**.** Comme le montre la figure.III.5 [40].

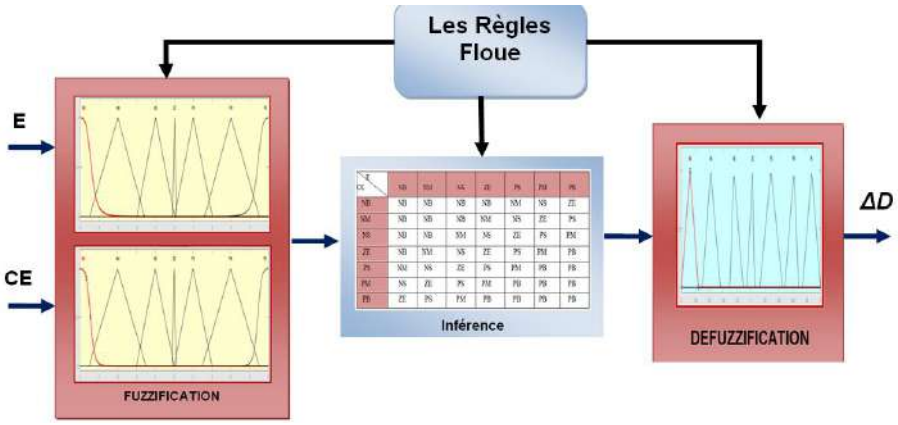


Figure III.5. Structure de base du contrôleur flou MPPT.

A. Fuzzification

Cette étape contient la méthode de conversion d'entrées numériques en variables linguistiques. Les variables d'entrée à un contrôleur flou MPPT sont : l'erreur E et le changement dans l'erreur Cela sortie de la logique floue est le changement dans le rapport cyclique ΔD du hacheur. On peut exprimer respectivement E et CE par [41]:

$$E(K) = \frac{P_{pv}(K) - P_{pv}(K-1)}{V_{pv}(K) - V_{pv}(K-1)} \quad \textbf{(III.1)}$$

$$CE(K) = E(K) - E(K-1) \quad \textbf{(III.2)}$$

Où : Ppv et Vpv sont respectivement la puissance et la tension du GPV.

Sept ensembles flous sont adoptés pour les variables d'entrée et de sortie : **PB**: 'Positif Grand', **PM**:' Positif Moyen', **PS**: 'Positif Petit', **ZE**: 'égal Zéro',**NS**: 'Négatif Petit',**NM**: 'Négatif Moyen', **NB**:' Négatif Grand'[42]. La figure III.6. Donne les fonctions d'appartenance choisies pour les variables d'entrée et de la sortie.

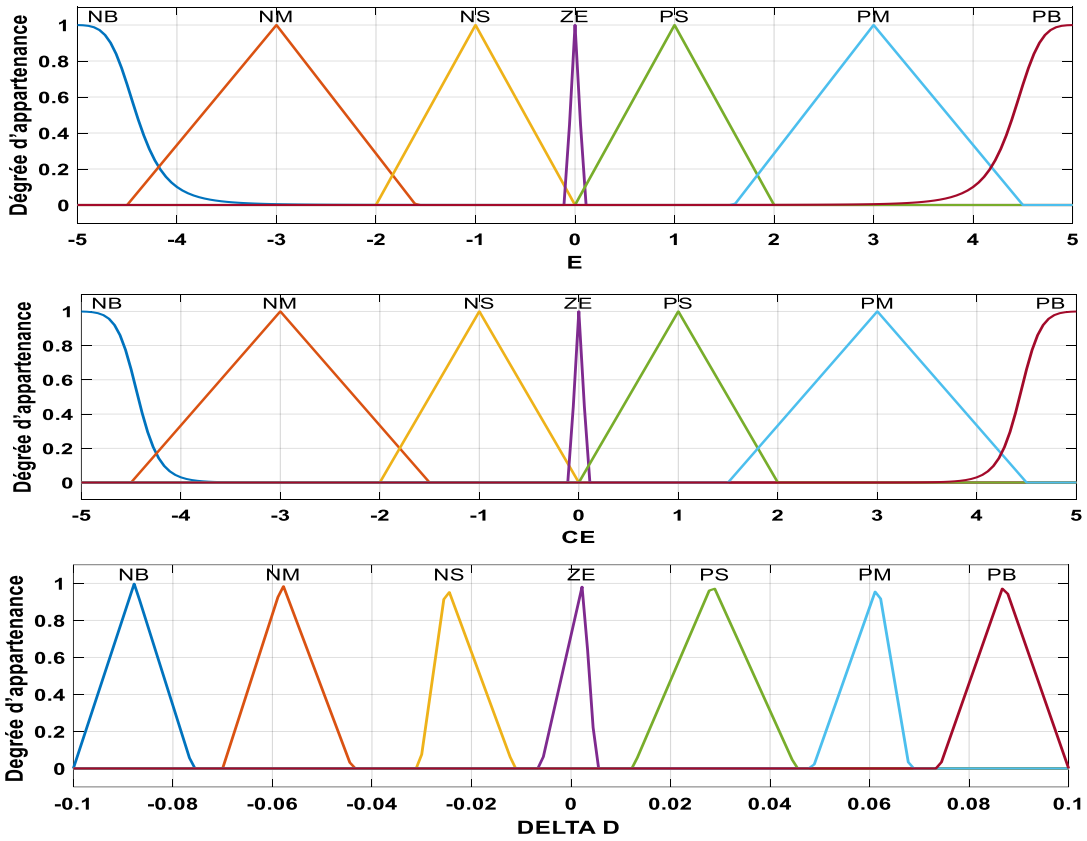


Figure III.6. Fonctions d'appartenance des entrées : E, CE et de la sortie ΔD

B. Méthode d'inférence

Le tableau III.1, représente la matrice d'inférence du régulateur floue MPPT. Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée (E) doit toujours être égale à zéro. Nous avons choisi dans cette étude la méthode de Mamdani comme une méthode d'inférence floue. Elle consiste à utiliser l'opérateur 'MIN' pour le 'ET', et l'opérateur 'MAX' pour le 'OU' [1] [38].

CE / E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Tableau.III.1. Table d'inférence du MPPT flou [38].

C. Défuzzification

Actuellement, il est nécessaire de passer de «domaine flou» vers «domaine réel», c'est la défuzzification. Cette étape peut être envisagée avec différentes méthodes, mais la plus populaire est appelée méthode de« centre de gravité ». Le centre de gravité de la fonction d'appartenance μ(Di) est calculé simplement pour obtenir les valeurs réelles, elle est donnée par [1]:

$$\Delta D = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu(D_i) - D_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu(D_i)} \qquad \textbf{(III.3)}$$

III.2.1.3.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 huit modules connectés en série et cinq modules connectés en parallèle pour fournir à la sortie une puissance de 8 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 III.7.représente le schéma global de la chaine PV dans l'environnement Matlab. Les paramètres utilisés sont résumés dans l'annexe.

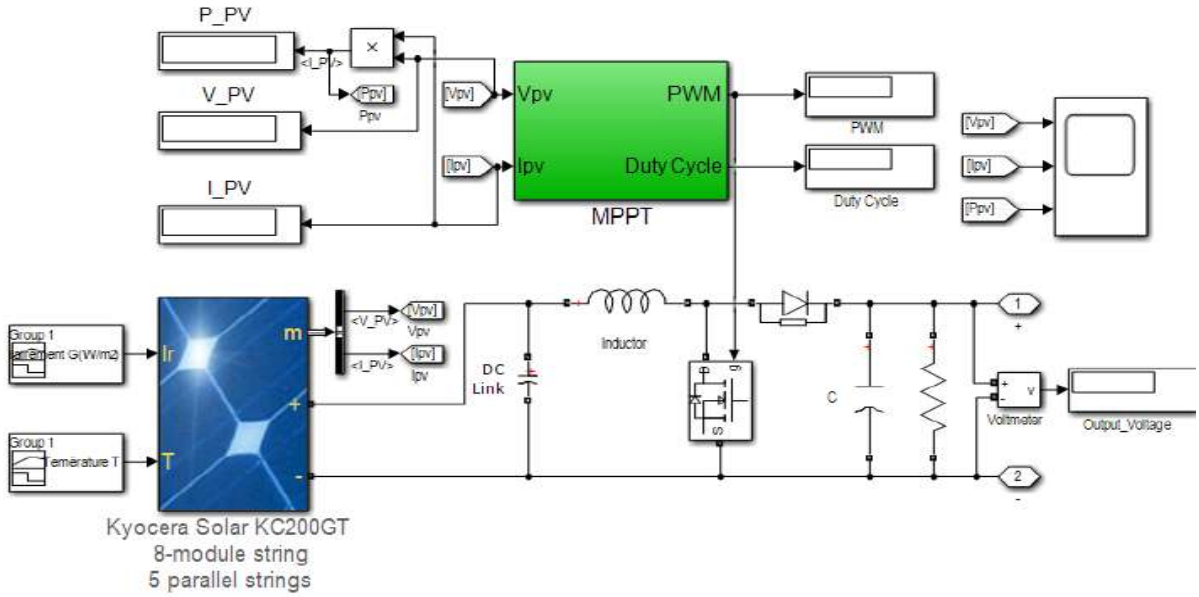


Figure III.7. Schéma bloc du système photovoltaïque dans l'environnement Matlab

Dans le but d'évaluer l'efficacité, la stabilité et la performance des deux techniques MPPT : P&O et logique floue, le système PV doit être testé sous une température de 25 C° voir la figure III.9, et sous différentes irradiations , l'éclairement est rapidement diminué de 1000 à 400 W/m2

durant la 1ère seconde, puis à partir de 2 secondes, il est augmenté à la valeur 900W/, enfin, il est diminué progressivement à la valeur 600W/m2à partir de la 3ème seconde, comme indiqué sur la figure. III.8.

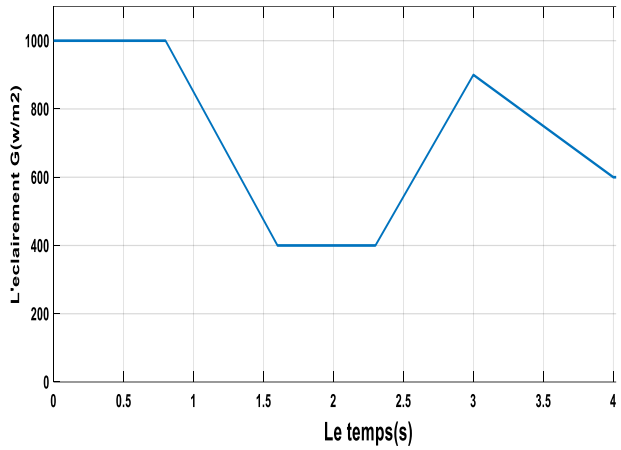


Figure.III.8. Profil de l'éclairement

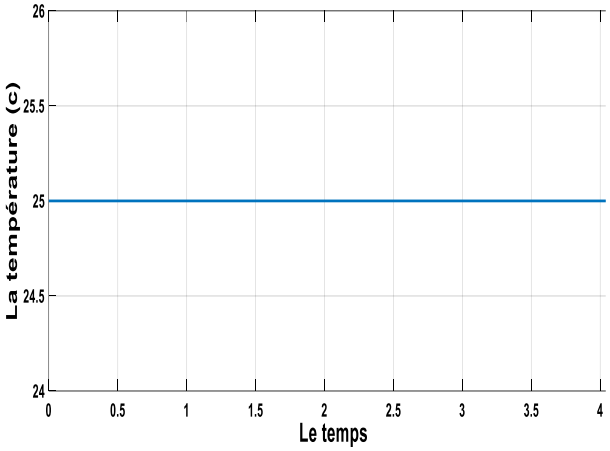
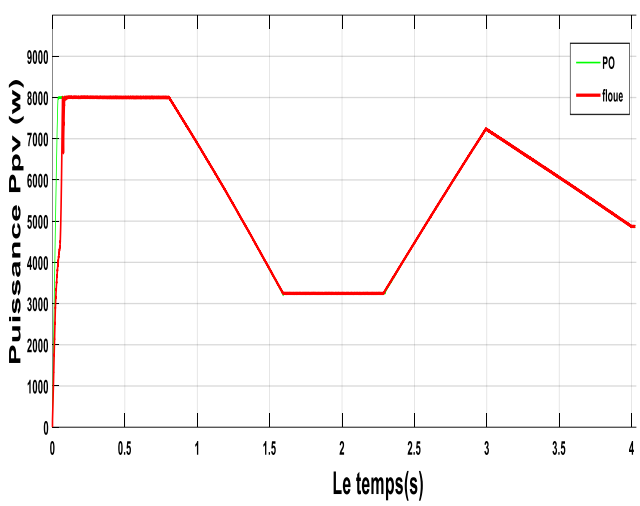
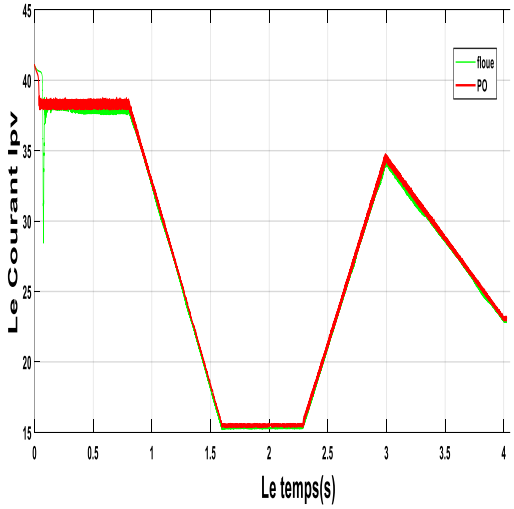


Figure III.9. Profil de la température

La puissance de sortie du système PV et le courant Ipv sont illustrés dans les figures suivantes :



a). Puissance de la sortie du système PV



b). Courant du système PV

Figure.III.10. Principaux résultats du test

D'après les résultats de la simulation, nous constatons que le système PV produit le maximum de la puissance quelque soient les conditions météorologiques avec les deux MPPT appliqués P&O et logique floue. Néanmoins, l'algorithme P&O présente des oscillations autour de la valeur optimale, l'oscillation autour du MPP peut être minimisé en réduisant la taille de l'étape de perturbation D. Cependant, les performances dynamiques sont gênées par une plus petite taille de pas de

perturbation. L'autre technique : logique floue a des performances supérieures. Elle fonctionne au point optimal sans oscillations.

III.2.2.Commande de la chaine de conversion éolienne

La caractéristique de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est une forme de cloche [1], comme le montre la figure III.11.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, représente les points optimaux recherchés, qui définissent une courbe de puissance optimale :

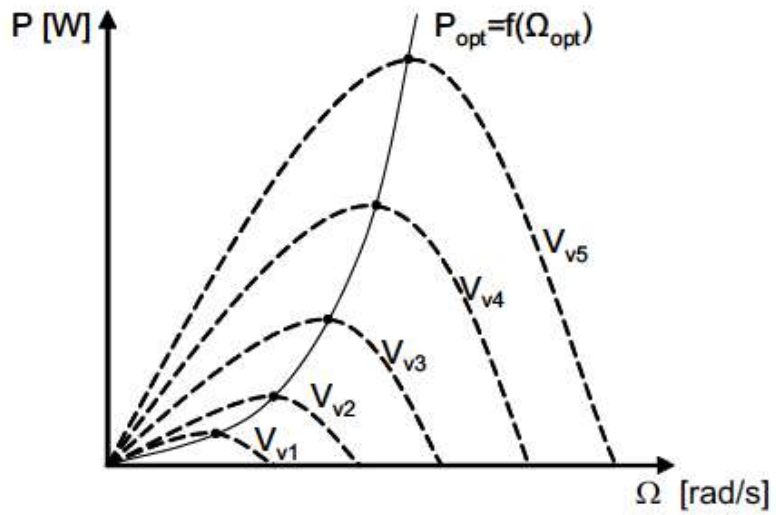


Figure.III.11. Caractéristiques de voilure dans le plan puissance-vitesse

La commande MPPT destinée pour une éolienne de petite puissance, doit respecter les contraintes de simplicité et du coût sans altérer l'efficacité [43]. On peut distinguer entre deux grandes catégories de stratégies MPPT : des stratégies nécessitant la connaissance préalable de la caractéristiqueCp (λ) de l'éolienne, et des stratégies ne nécessitant pas la connaissance de cette courbe caractéristique [1].

- **MPPT sans connaissance de la courbe caractéristique Cp (λ) de la turbine :**

Son nom l'indique, dans cette catégorie, nous considérons que la caractéristique Cp (λ) de la turbine, n'est pas connue. Dans ce cas, nous adoptons des contrôleurs MPPT qui se basent sur les méthodes classiques comme le type P&O qui a été appliquée avec succès dans les systèmes photovoltaïques, ou bien sur les méthodes intelligentes (logique floue). Pourtant, le processusdeconversiondel'énergieéolienneestpluscompliquéàcausedelanaturestochastique du vent, du comportement non-linéaire du générateur et du système électrique, alors l'application de ces méthodes à un système de conversion éolienne nécessite des modifications et des adaptations [25].

❖ **MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine** :

Nous supposons que la caractéristique de la turbine est connue, donc, il suffit de suivre la courbe de puissance optimale. Dans cette catégorie, il existe plusieurs structures de commande, comme la commande en vitesse : on détermine la vitesse optimale selon chaque vitesse de vent et commander le rotor pour suivre cette vitesse. De plus, il y a la commande en couple : on calcule le couple optimal pour chaque vitesse de vent [25].

Dans le présent travail, nous supposons que les caractéristiques de la turbine sont connues, et nous adaptons La commande en couple.

III.2.2.1.La commande en couple.

Le système éolien proposé dans cette thèse est formé par une turbine, une machine synchrone à aimant permanent (MSAP), 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 III.12.

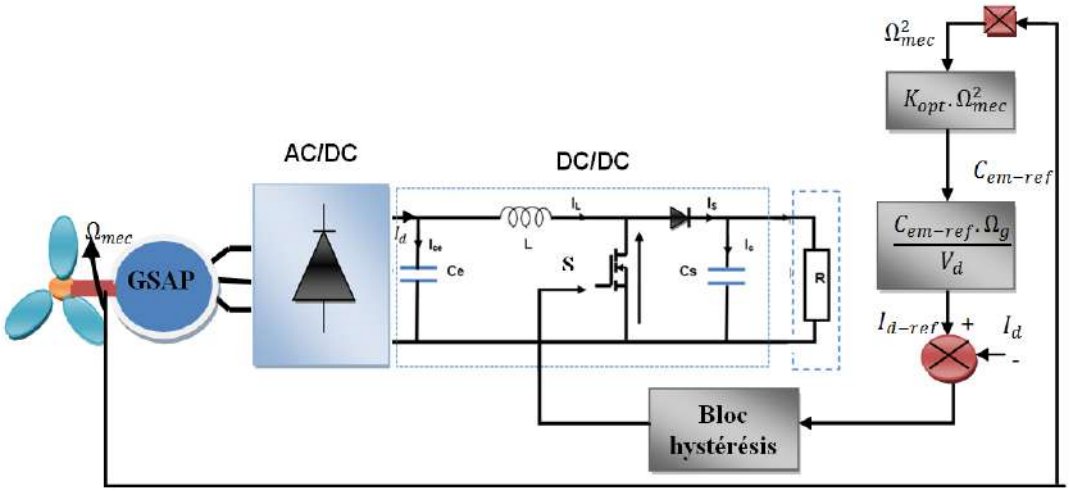


Figure.III.12. Structure de contrôle d'une turbine éolienne

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 la turbine [1]. En conséquence, le couple mécanique exercé sur l'arbre est nul.

$$J\frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} = C_G - C_{em} - C_r = 0 \qquad \textbf{(III.4)}$$

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

$$C_{méc} = C_G - C_{em} = 0 \Rightarrow C_G = C_{em} \quad \textbf{(III.5)}$$

Et nous avons :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_G} \Rightarrow C_G = \frac{C_{aer}}{G} \quad \textbf{(III.6)}$$

Notons que G=1, donc l'équation (III.4) devient :

$$C_{aer} = C_{em} \quad \textbf{(III.7)}$$

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

$$C_{em-ref} = C_{aer-est} \quad \textbf{(III.8)}$$

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

$$C_{aer-est} = (\frac{1}{2} \cdot \rho\pi R^2 V_{est}^3 \cdot C_p) \cdot \frac{1}{\Omega_{t-ext}} \quad \textbf{(III.9)}$$

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

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \Rightarrow \Omega_{t-est} = \Omega_{méc} \quad \textbf{(III.10)}$$

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

$$V_{est} = \frac{\Omega_{t-est} R}{\lambda} \quad \textbf{(III.11)}$$

En utilisant les expressions du (III.9) au (III.11), nous obtenons :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho\pi R^5 \cdot C_p}{\lambda^3} \Omega_{mc}^2 \quad \textbf{(III.12)}$$

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

$$C_{cm-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \Omega_{mcc}^2 \quad \textbf{(III.13)}$$

En posant :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi R^5 \cdot C_{p-\max}}{\lambda_{opt}^3} \quad \textbf{(III.14)}$$

L'expression (III.13) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em-ref} = K_{opt}.\Omega_{mec}^2 \quad \textbf{(III.15)}$$

La figure (3.17) montre le circuit de contrôle du hacheur boost du système éolien. Le courant de référence *Id-réf*_est déterminé à partir du couple *Cem-réf* et la tension redressée *Vd*. Nous appliquons la formule suivante [36] [1] :

$$I_{d-ref} = \frac{C_{em-ref}.\Omega_g}{V_d} \quad \textbf{(III.16)}$$

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 [1].

III.2.3.Simulation de la chaine de conversion éolienne

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

- Une turbine à axe horizontal,
- Une machine synchrone à aimant permanent (MSAP),
- 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 figure III.13.Représente le schéma global de la chaine éolienne dans l'environnement Matlab. Les paramètres utilisés sont résumés dans l'annexe.

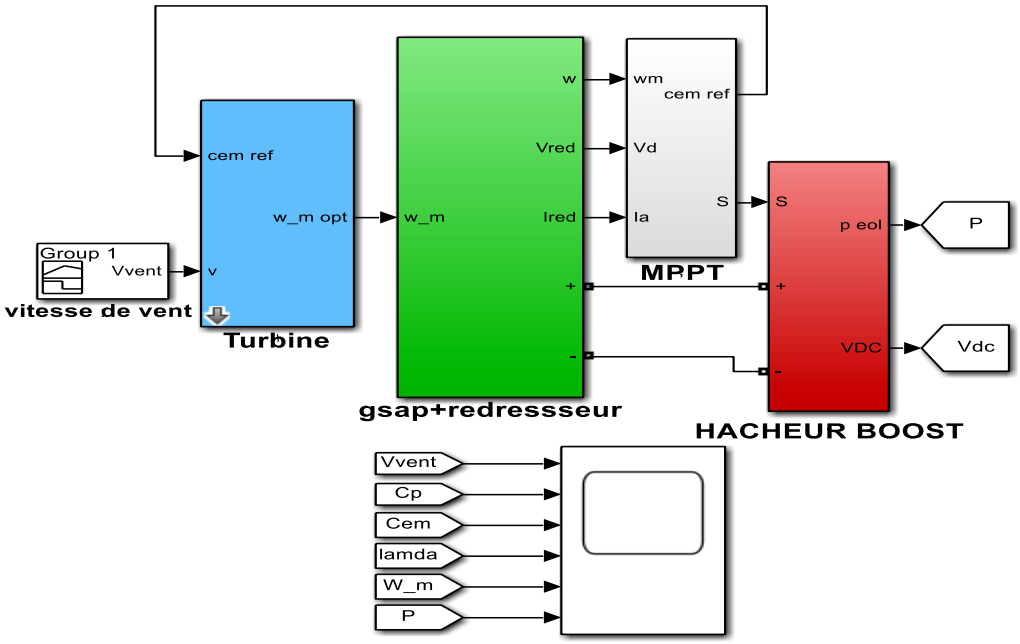


Figure.III.13. Schéma bloc global de la chaine éolienne dans l'environnement Matlab

Le sous bloc qui représente la turbine éolienne est donné par la figure III.14.

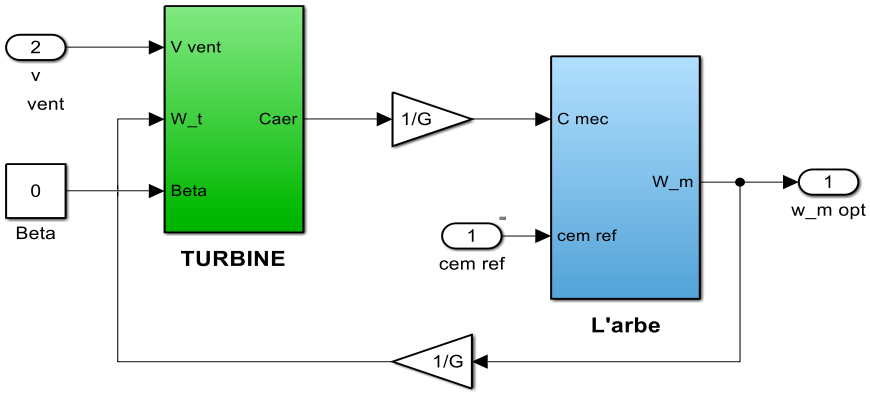


Figure.III.13. Bloc de simulation de la turbine éolienne

Afin d'évaluer la performance de la commande MPPT appliquée sur la chaine éolienne, nous avons appliqué à la turbine un profil de vent donné par la figure III.15.Les figures ci-dessous représentent respectivement la puissance du système éolien Peol, le couple électromagnétique Cem, la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse spécifique, le coefficient de puissance Cp, le courant : ia, ib et ic de la MSAP et le courant à la sortie du redresseur pour une vitesse moyenne du vent égale à 12 m/s.

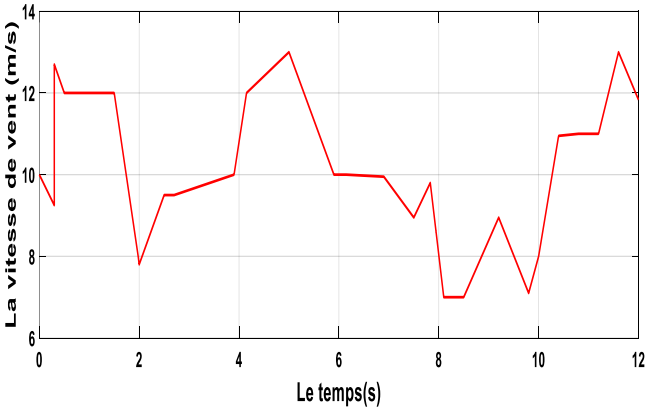


Figure III.14. Vitesse de vent

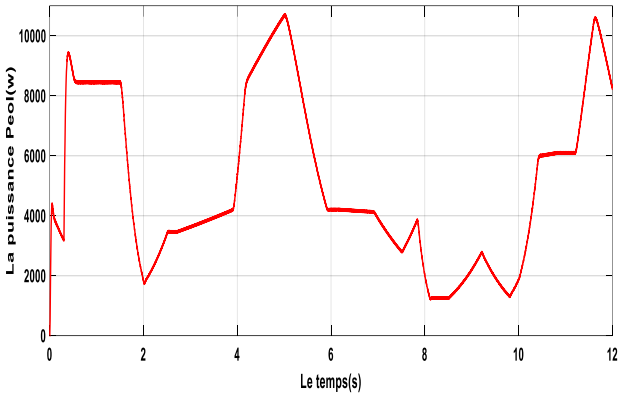


Figure III.15.la puissance éolienne.

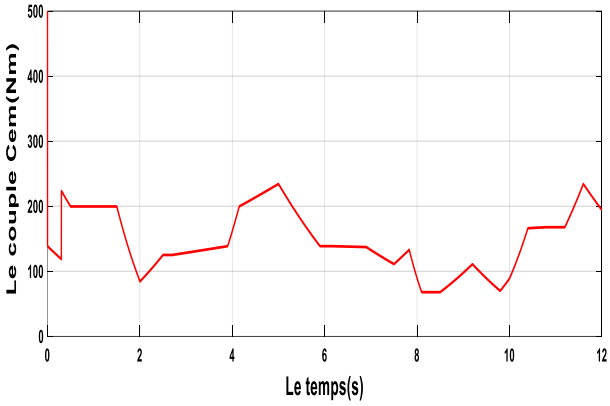


Figure III.16. le couple Cem

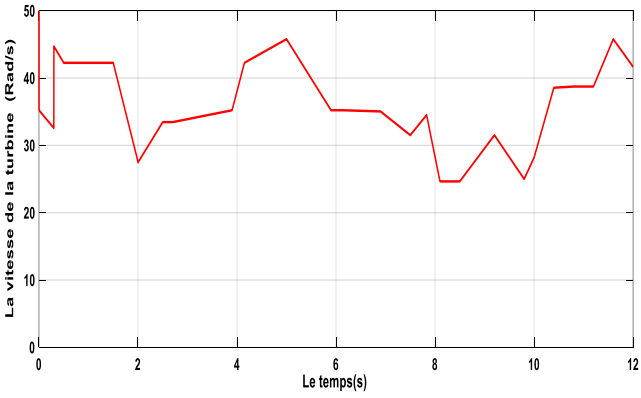


Figure III.17.la vitesse de la turbine.

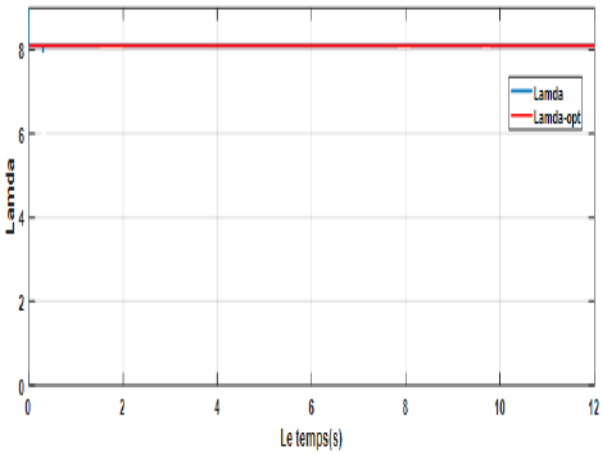


Figure III.18. Vitesse spécifique

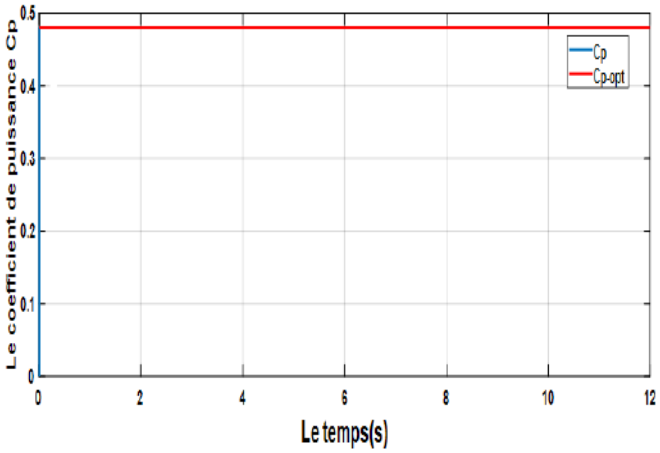
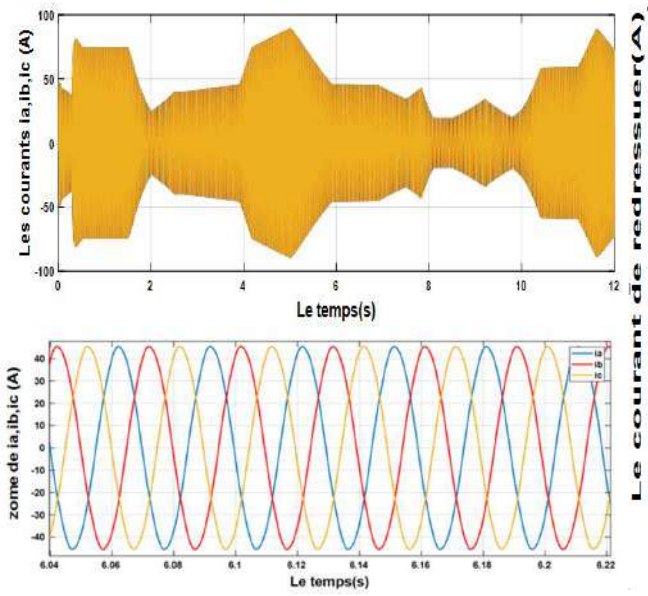


Figure III.19. Coefficient de puissance.



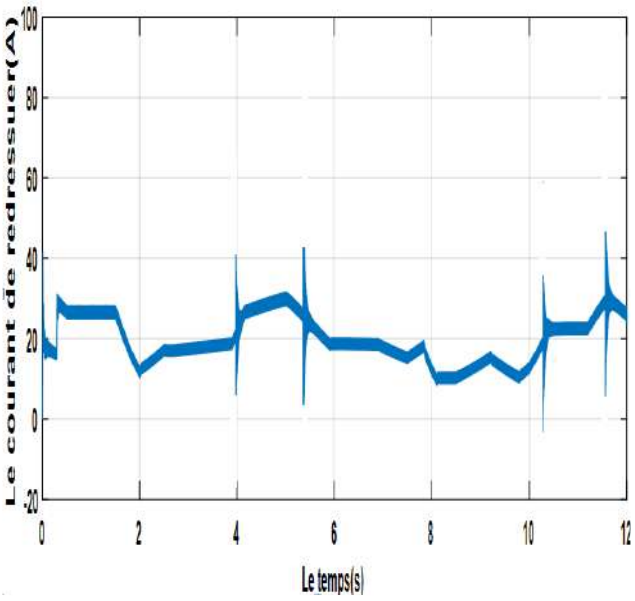


Figure III.21. Courant : ia, ib et ic de la MSAP. **Figure III.22.**Courant de sortie du redresseur.

Les résultats de simulation montrent bien l'adaptation du couple électromagnétique, la vitesse de rotation et la puissance produite avec les variations de la vitesse du vent, cela se vérifie à travers la vitesse spécifique qui est bien ajustée à sa valeur optimale 8.1 qui correspond à un coefficient de puissance Cp= 0.48 grâce à la commande MPPT appliquée.

III.3. Contrôle de la tension Vdc du bus DC par le système de stockage

Les différentes sources du système sont interconnectées par l'intermédiaire d'un bus DC dont la tension Vdc est fixée à 640V. 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 Vdc-réf s'écrit [1] :

$$v_{dc-ref} = 2\sqrt{2}v_s \qquad \textbf{(III.17)}$$

Avec Vs : la valeur efficace de la tension de phase à la sortie de l'onduleur (Vs=220 V).

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 30 % et 90%.Au contraire, quand il existe un excès d'énergie, la tension du bus continu devient supérieure à la valeur de référence, donc nous chargeons la batterie à

partir de cet excès [1]. La régulation de la tension du bus continu est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant.

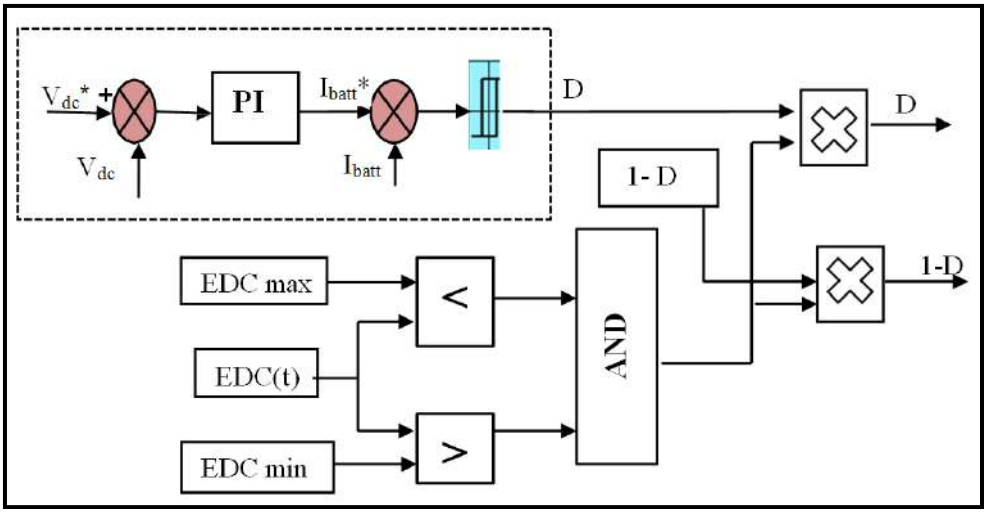


Figure III.23. Schéma de commande de la tension du bus continu

La figure (III.23) 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 [24]:

- 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.

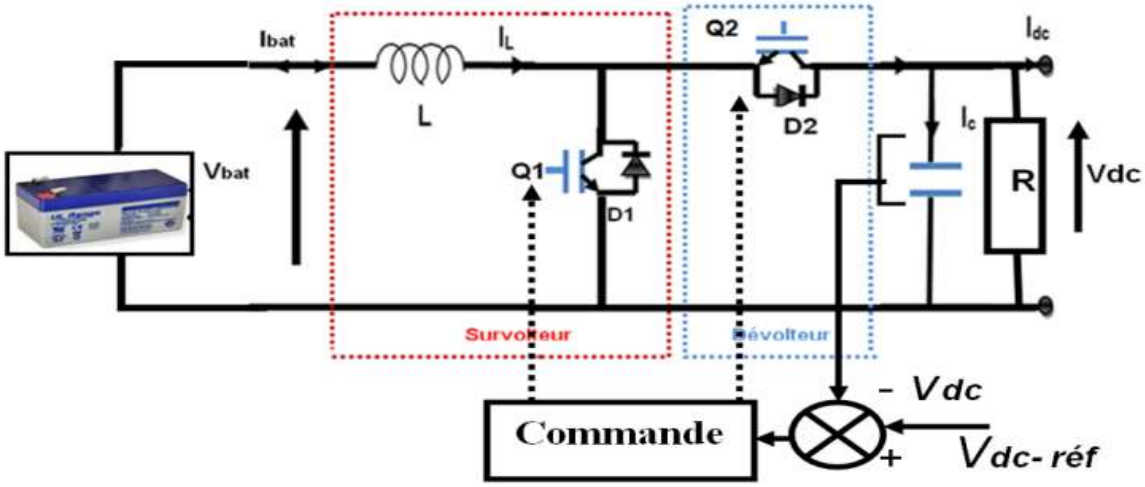


Figure III.24. Structure de contrôle de l'hacheur réversible en courant

III.3.1.1.Boucle de régulation de la tension Vdc

La boucle de courant est plus rapide que celle de la tension, ce qui revient à dire que la fonction de transfert de la boucle de courant n'intervient pas dans la stabilité de la boucle de tension [1].

Le comportement de l'hacheur réversible en courant en régime permanent est décrit par le système d'équations suivant.

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt} i_L = \dfrac{1}{L}[V_{bat} - DV_{dc}] \\ \dfrac{d}{dt} V_{dc} = \dfrac{1}{C_{dc}}\left[DI_L - \dfrac{V_{dc}}{\mathrm{R}} - I_{dc}\right] \end{cases} \quad \textbf{(III.18)}$$

Par l'introduction de l'équation de courant dans l'équation de tension, on trouve l'équation dynamique pour le réglage de la tension du bus DC [37] :

$$C_{dc}\frac{d}{dt}V_{dc} = \frac{V_{bat}}{V_{dc}}I_L - \frac{V_{dc}}{R} - I_{dc} \quad \textbf{(III.19)}$$

Avec :

$$\mathrm{D} = \frac{V_{bat}}{V_{dc}} \quad \textbf{(III.20)}$$

Comme cette équation n'est pas linéaire on la linéarisé par un changement de variables :$X = (V_{dc})^2$

$$\frac{dX}{dt} = 2V_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} \Rightarrow \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{2V_{dc}}\frac{dX}{dt} \quad \textbf{(III.21)}$$

Et on obtient la relation linéaire suivante :

$$C\frac{dX}{dt} = 2 \cdot i_L \cdot V_{batt} - 2\frac{X}{R} - 2 \cdot I_{dc} \cdot V_{dc} \quad \textbf{(III.22)}$$

Ce qui donne dans le domaine de Laplace la fonction de transfert de notre système :

$$FT_X(s) = \frac{V_{batt} \cdot R}{\frac{RC}{2} \cdot s + 1} \quad \textbf{(III.23)}$$

Avec un correcteur PI de la forme$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$, on trouve la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF(s) = \frac{2 \cdot V_{batt} \cdot R \cdot K_\mathrm{p} \cdot (s + K_\mathrm{i}K_\mathrm{p})}{R \cdot C \cdot s^2 + 2 \cdot (1 + V_{batt} \cdot R \cdot K_\mathrm{p}) \cdot s + 2 \cdot V_{batt} \cdot R \cdot K_p^2 \cdot K_\mathrm{i}} \quad \textbf{(III.24)}$$

Finalement on trouve les coefficients Kp et Ki en identifiant le dénominateur a celui de la forme canonique.

$$\begin{cases} 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = 2 \cdot \left(1 + V_{batt} \cdot R \cdot K_p\right) & \text{d'où } K_p = \dfrac{1}{V_{batt}} \cdot \left[\xi \cdot \omega_n \cdot C - \dfrac{1}{R}\right] = 2 \\ \omega_n^2 = 2 \cdot V_{batt} \cdot R \cdot K_p^2 \cdot K_i & \text{d'où } K_i = \dfrac{C \cdot \omega_n^2}{2 \cdot V_{batt} \cdot K_P^2} = 120 \end{cases} \quad \textbf{(III.25)}$$

III.3.1.2.Simulation du bus continu (test de robustesse)

Afin de tester l'efficacité de la commande utilisée pour contrôler la tension du bus continu, nous avons utilisé une consigne de référence variable, la tension est progressivement augmentée de 640 à 660 V durant la 1ère seconde, ensuite elle est rapidement diminuée à la valeur 590V à l'instant t= 1.5s, après la tension Vdc-réf est augmentée à la valeur 600V à t=2.7s, enfin elle est rapidement augmentée à la valeur 640 V à partir de l'instant t= 3.4s, comme indiqué sur la figure III.25.

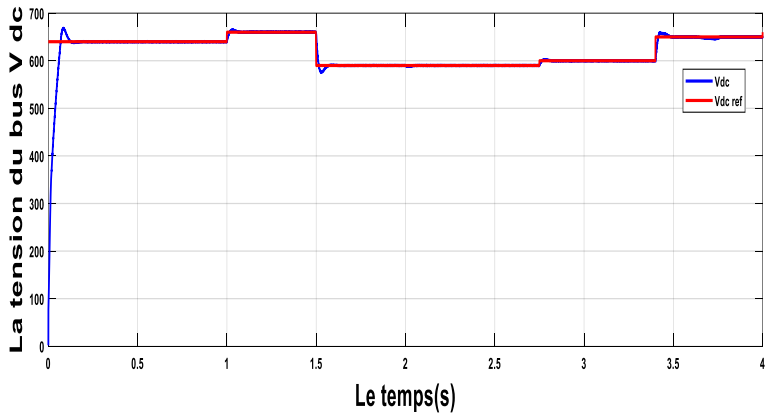


Figure III.20.régulation de bus continue

Les résultats obtenus montrent que la tension du bus continu suit la tension de référence avec une bonne précision et stabilité.

III.4. Stratégies de commande MLI de l'onduleur

En adoptant la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) afin d'obtenir les signaux de commande des interrupteurs d'onduleur (Si). Comme le montre la figure III.26, la technique MLI consiste à comparer les trois tensions de références sinusoïdales (*Va**, *Vb**, *Vc**) de même amplitude décalées de 120° l'une par rapport à l'autre à un signal (porteuse) triangulaire d'une fréquence *FC* (fréquence de commutation), les intersections entre ces deux signaux définissent le signal de commande.

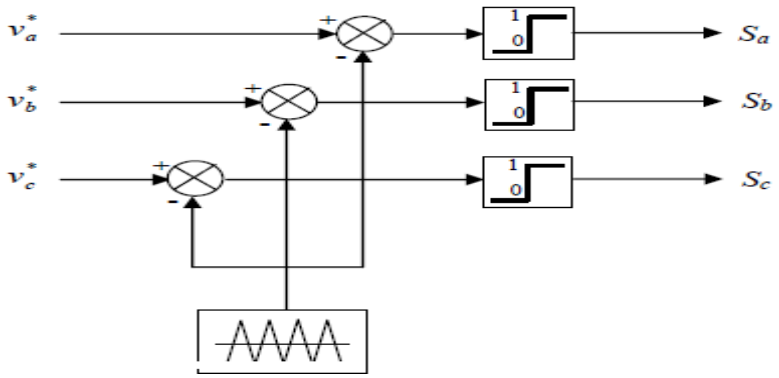


Figure.III.21. Principe de la modulation de la largeur d'impulsion M.L.I.

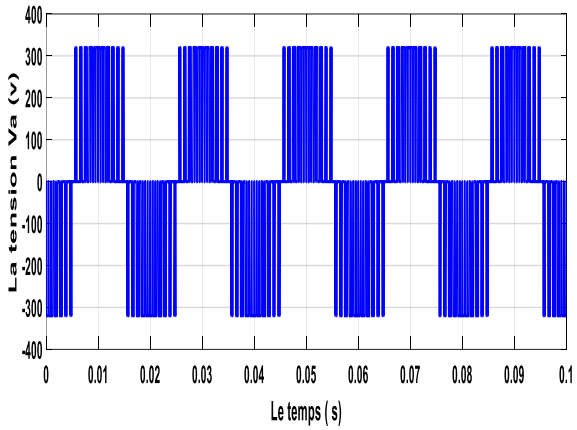


Figure III.22. Tension Va de l'onduleur

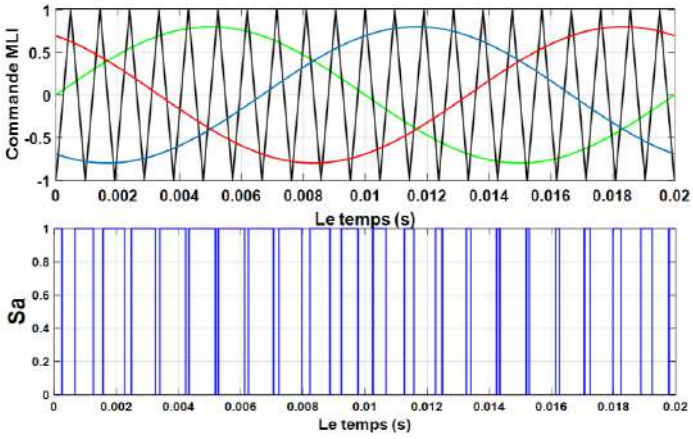


Figure III.23. Principe de la commande MLI

Les figures III.27 et III.28 montrent respectivement le comportement d'une MLI réalisée avec la technique "triangulo_Sinusoïdale " et la tension Va de l'onduleur.

III.5. Régulation du courant de poste onduleur

Dans notre système la charge est de type continu, c'est une poste à soudé à arc (poste onduleur) modélisé par une charge résistive de 0.1 ohm, de puissance nominale de 2.25 KW, un courant nominal de 150A avec une tension nominale de 15V. Les paramètres de ce poste sont résumés dans l'annexe.

Le principe de fonctionnement de poste onduleur est donné par la figure III.29, le courant alternatif triphasé de l'onduleur est en premier lieu redressé par un pont de diodes, filtré et lissé, ce courant est transformé en courant alternatif monophasé et haché par des transistors de puissance (IGBT) à des fréquences qui peuvent être de l'ordre de 20KHz, la tension est alors abaissé et le courant augmenté par un transformateur monophasé ,un redresseur à pont de diode permet d'obtenir le courant de soudage après le lissage [44].

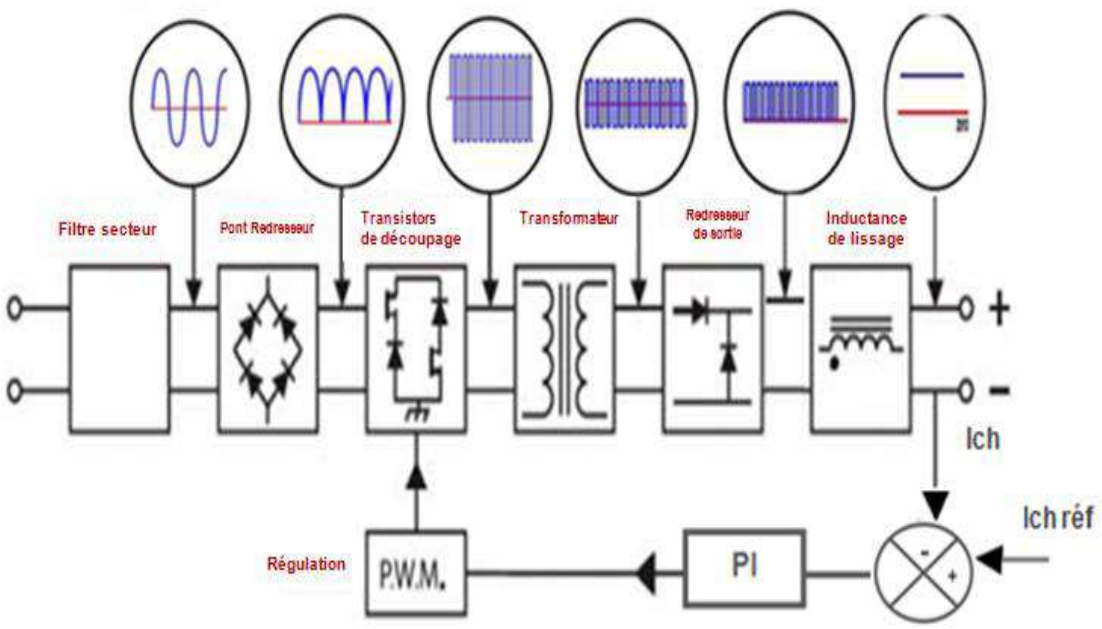


Figure III.24. Principe de fonctionnement du poste à soudé onduleur.

Nous comparons entre le courant de soudage Ich et le courant de référence Ich-réf, l'erreur produite par cette comparaison est envoyé dans un régulateur de type PI la sortie de ce régulateur entrée dans un bloc MLI pour obtenir le signal de commutation (la fermeture et l'ouverture) des interrupteurs du transistor bipolaire.

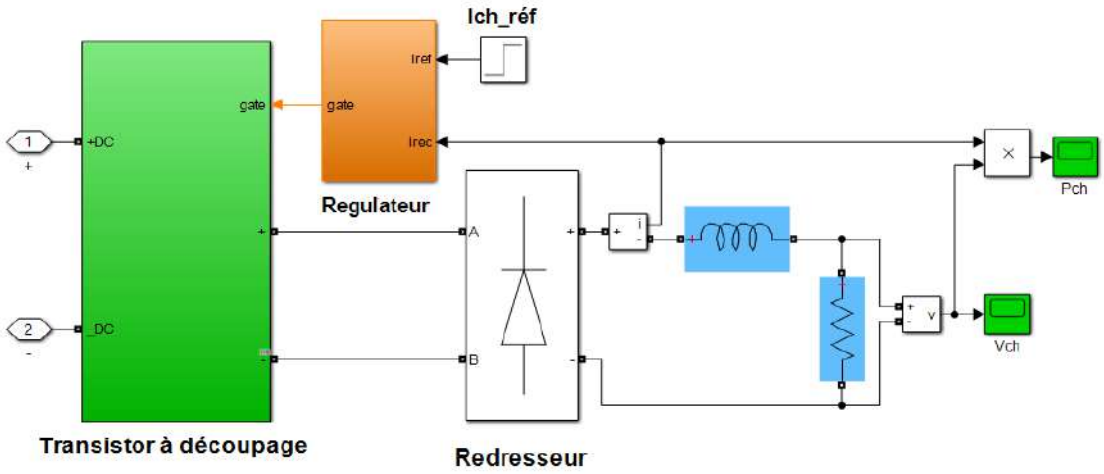


Figure III.30. Bloc de la charge sous matlab-simulink.

III.6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, le contrôle des différents composants du système hybride autonome a été présenté. En premier lieu et afin d'améliorer l'efficacité des sources d'ER (PV et éolien), nous avons adoptées algorithmes MPPT. Pour optimiser l'énergie produite par le système PV deux algorithmes MPPT sont développés, à savoir : Perturbation et Observation et la Logique Floue. Pour le système éolien, nous supposons que les caractéristiques de la turbine sont connues, et nous adaptons l'algorithme MPPT basé sur la commande en couple. La deuxième partie concerne le contrôle de la tension du bus continu à une valeur de référence par le système de stockage. Ainsi, la commende de l'onduleur qui connecté au bus continu .Enfin, nous avons terminé cette partie par la régulation de courant de poste à soudé a une valeur de référence. Afin de tester l'efficacité des différentes commandes appliquées pour les sous-systèmes distincts du SEH, nous considérons quelques tests sous environnement Matlab. Les résultats obtenus nous permettent de valider ces commandes.

Le chapitre suivant est consacré à la gestion de l'énergie d'un système hybride PV/éolien avec la batterie appliquée au poste de soudage à arc.

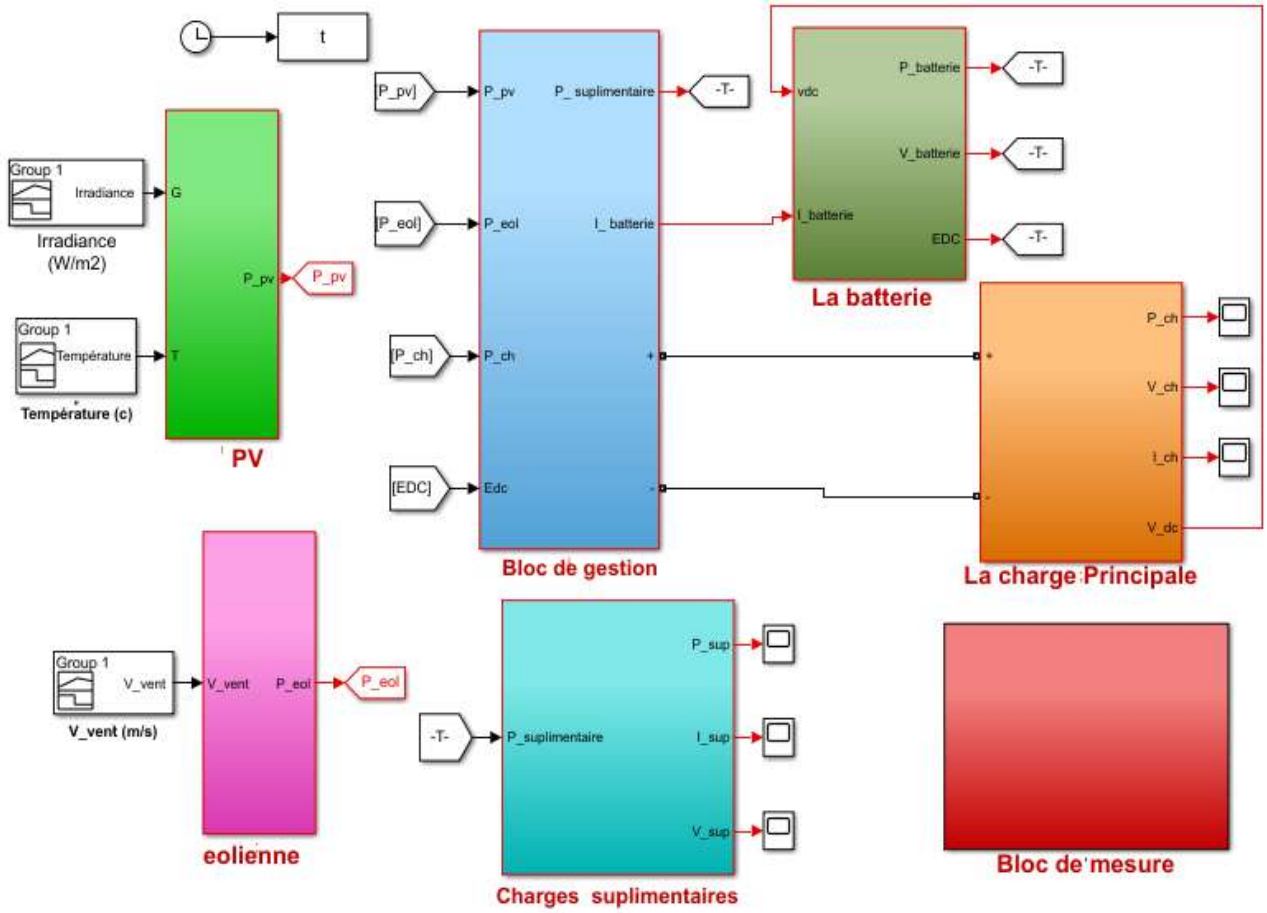
IV.Chapitre 4 : Gestion et simulation du SEH appliquée au poste à soudé onduleur

IV.1. Introduction

L'objectif principal de cette mémoire consiste à proposer une stratégie de gestion de l'énergie entre les différents éléments du SEH: PV/ éolien/ batterie, d'une manière optimale pour alimenter un poste à soudé onduleur dans la région d'Adrar, au sud de l'Algérie.

La stratégie de gestion proposée est basée essentiellement sur la connaissance de l'expert qui a conçu les règles. En effet, de nombreux scénarios de gestion peuvent être proposés en fonction des sources d'énergie disponibles, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie pendant 24 heures afin d'assurer le bon déroulement de l'algorithme.

Dans ce cadre, nous avons utilisé le Matlab/Simulink, qui permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement des différents éléments qui constitue le système d'énergie hybride.



FigureIV.1. Schéma du système global sous Matlab/Simulink.

IV.2. Différentes modes de fonctionnement du système hybride

Notre système est constitué par un GPV d'une puissance de 8 kW, d'un aérogénérateur de puissance nominale égale à 8.5 kW et d'une batterie de 65 Ah et 24V. Le SEH est conçu afin d'alimenter une charge principale DC et des charges supplémentaires. On considère que :

- Les systèmes PV et l'éolien sont considérés comme des sources principales ;
- La batterie est utilisée à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction,
- La charge principale DC est toujours connectée,
- Les charges supplémentaires sont utilisées pour dissiper le surplus de production lorsque la batterie est complètement chargée.

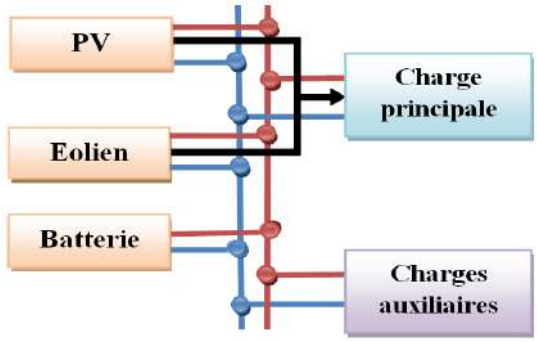
Par conséquence pour simplifier l'étude, nous supposons que chaque composant a deux états ; actif ou inactif, par exemple une journée en été, le rayonnement solaire est plus fort pendant le jour alors que le vent peut souffler dans la nuit .Le tableau (IV.1) exprime l'état de chaque composant constituant le SEH. En effet, selon les sources d'énergie disponible, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie. Nous distinguons plusieurs scénarios de fonctionnement du système hybride. Tous ces scénarios sont disponibles dans les tableaux IV.2 et IV.3.

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 ou les 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 et EDC est supérieur à seuil haut.	En cas de manque d'énergie et EDC est inférieur à seuil haut.

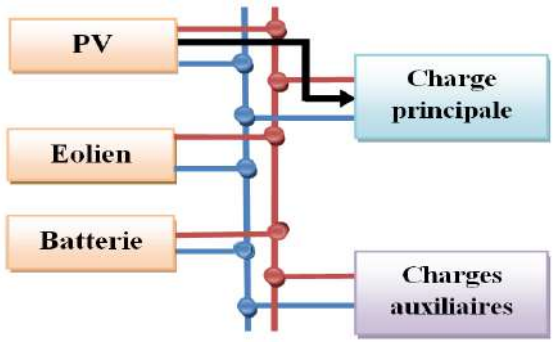
Tableau IV.1. L'état de chaque composant constituant le SEH

IV.2.1.Différents scénarios de fonctionnement du SEH

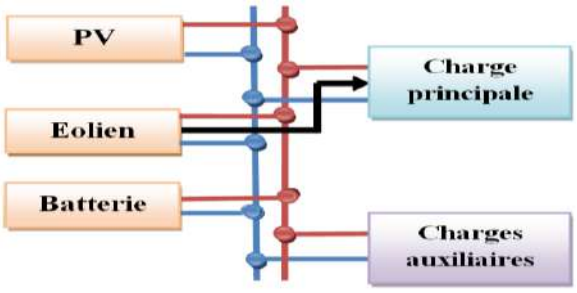
IV.2.1.1.Scénarios de fonctionnement pendant un jour ensoleillé ou nuageux



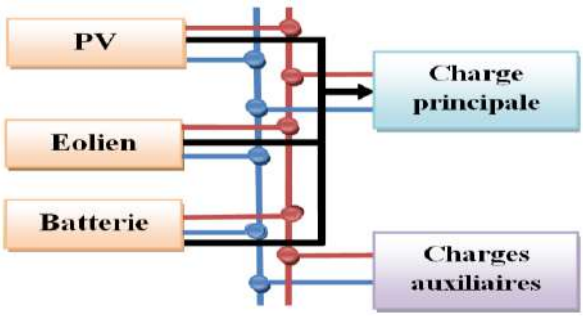
Cas 01



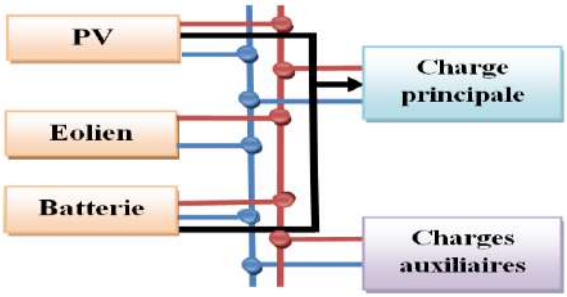
Cas 02



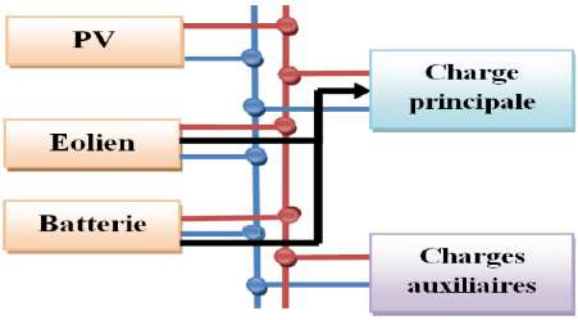
Cas 03



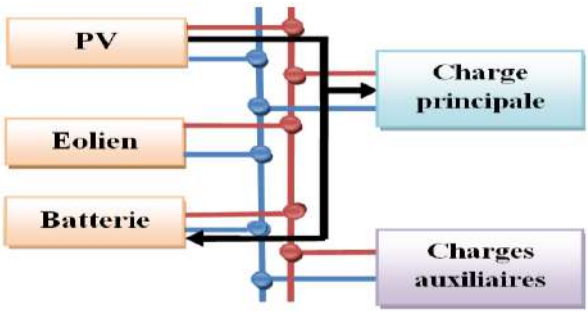
Cas 04

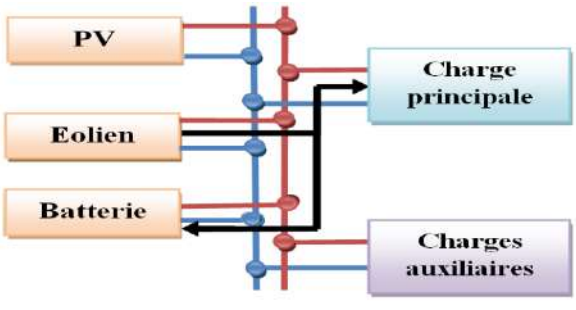


Cas 05



Cas 06





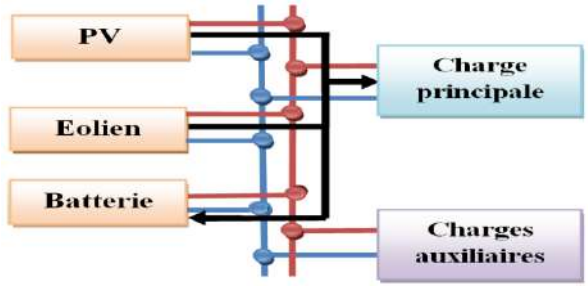
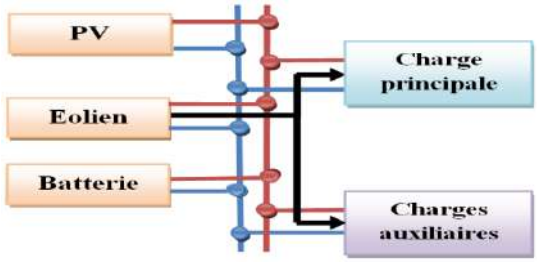
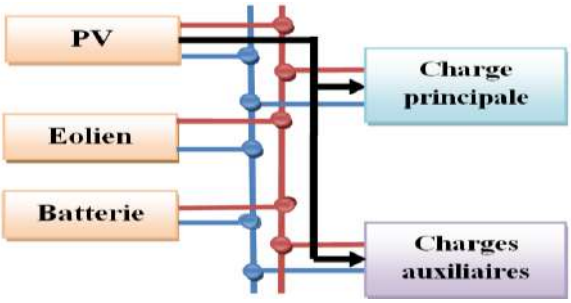
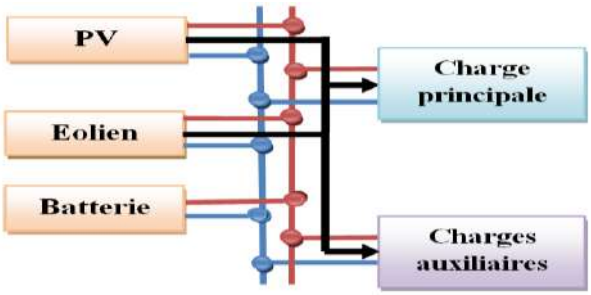
Cas 07	Cas 08
	
Cas 09	**Cas 10**
	
Cas 11	**Cas 12**

Tableau IV.2. Scénarios de fonctionnement d'SEH pendant un jour ensoleillé ou nuageux

IV.2.1.2.Scénarios de fonctionnement pendant la nuit

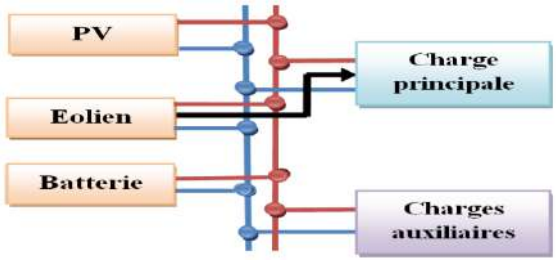
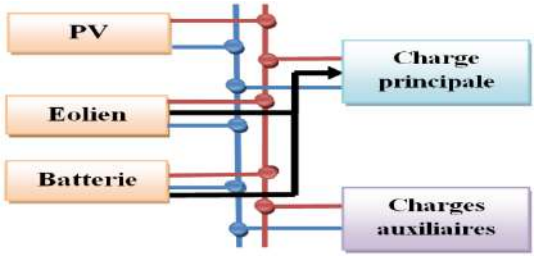
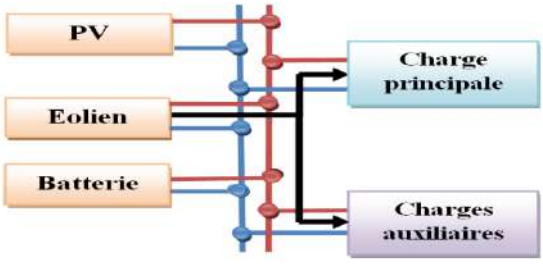
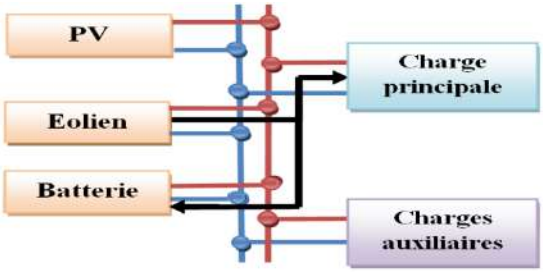
Cas 13	Cas 14
	
Cas 15	**Cas 16**
	

Tableau IV.3. Scénarios de fonctionnement du système hybride

IV.3. Système de supervision du SEH

Nous avons proposé deux stratégies de gestion : la première consiste à considérer le système de conversion éolien comme étant la source principale pour alimenter la charge lorsque la puissance éolienne est supérieur ou égale a la puissance photovoltaïque , puis la deuxième considère plutôt le système de conversion photovoltaïque comme étant la source principale pour alimenter la charge.

Pour ces deux stratégies, lorsqu'un système de conversion (éolien ou photovoltaïque) est considéré comme étant la source principale, l'autre système servira de source d'à point et s'activera dès que le premier ne répond pas à la demande de la charge.

La batterie est utilisée à la fois comme source dans le cas d'un manque de production, et comme système de stockage dans le cas d'une surproduction.

Du fait que le système hybride est isolé, nous avons prévu une charge dissipative qui sert de "trop-plein" aux éventuelles surproductions représenté par la puissance supplémentaire (Psup).

Le principe de fonctionnement de ces deux stratégies de gestion est donné par deux algorithmes représentés par les organigrammes donnés par les deux figures(IV.2) (IV.3) et détaillé par le tableau (IV.4).

- **Equations illustrant la gestion de puissance :**

$$\Delta P0 = Peol - Ppv \quad \textbf{(IV.1)}$$

$$\Delta P1 = Peol - Pch \quad \textbf{(IV.2)}$$

$$\Delta P2 = Ppv - Pch \quad \textbf{(IV.3)}$$

$$\Delta P3 = Phybr - Pch \quad \textbf{(IV.4)}$$

Avec : Peol : la puissance éolienne, Ppv : la puissance photovoltaïque, Pch : la puissance de charge, Phybr : la somme des puissances éolienne et photovoltaïque.

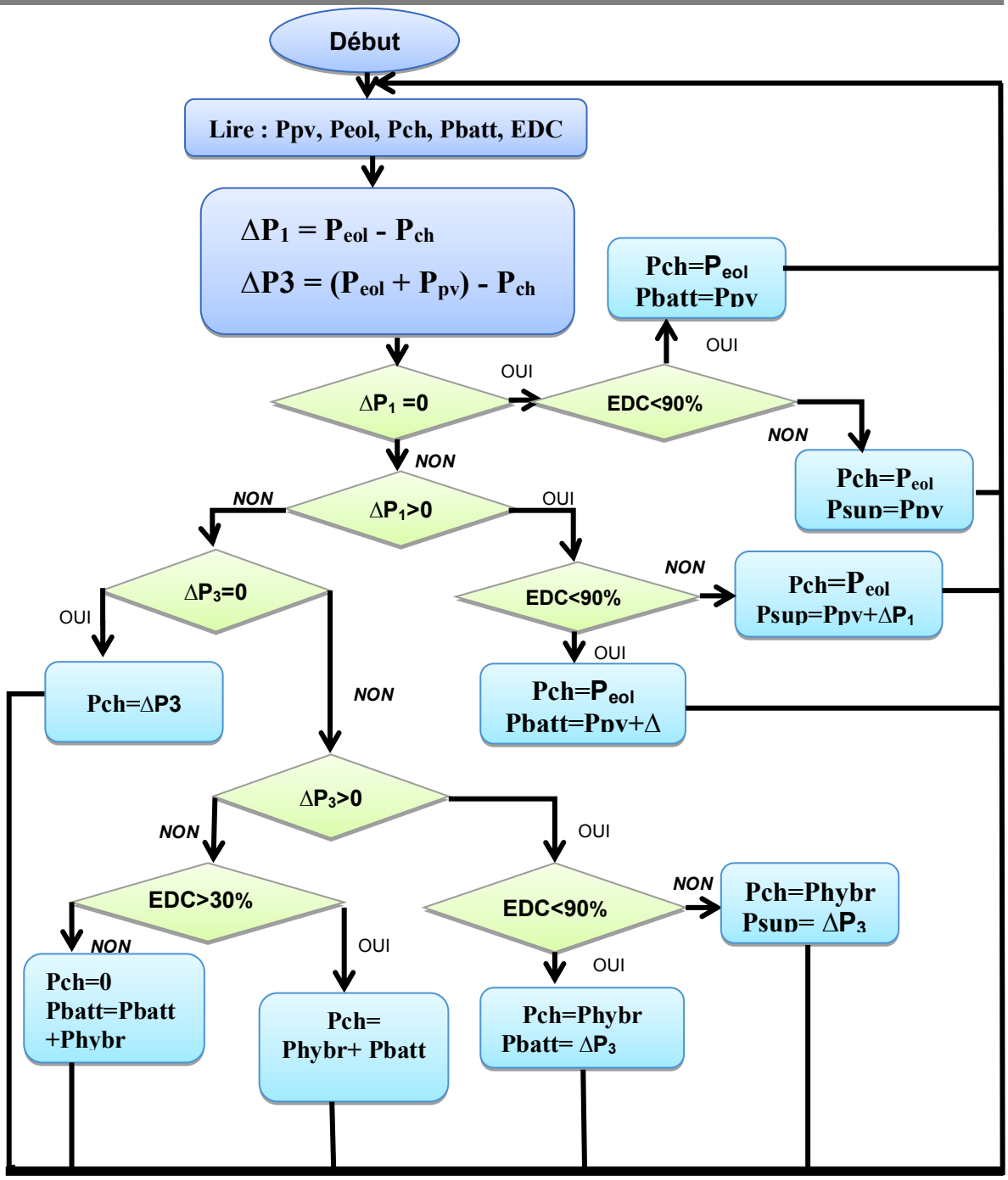


Figure IV.2. Organigramme de gestion qui considère le système de conversion éolien

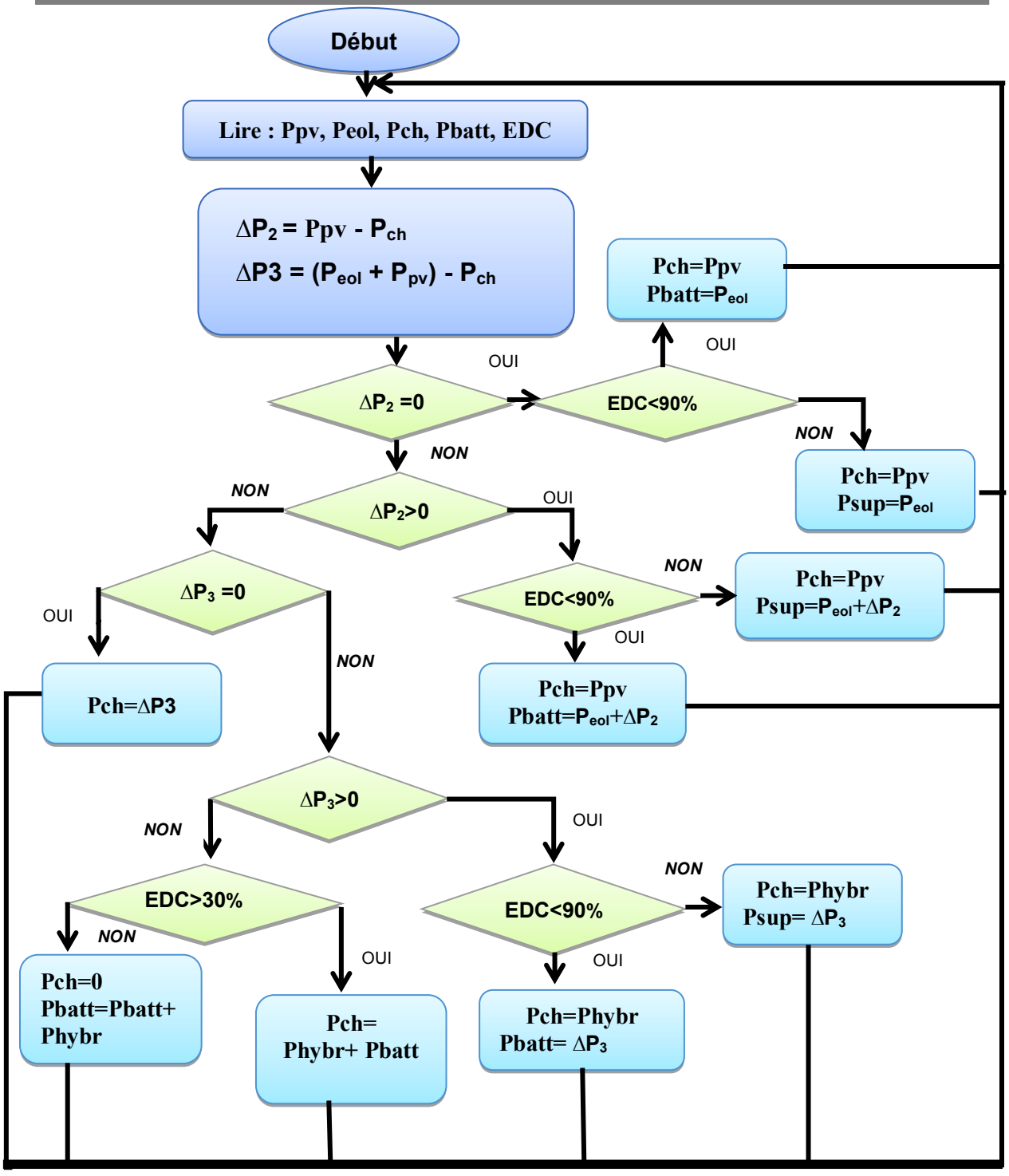


Figure IV.3 Organigramme de gestion qui considère le système de conversion photovoltaïque

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

Tableau IV.4 Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion.

❖ **Mode d'alimentation possible de la charge principale**

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

Tableau IV.5. Différents modes d'alimentation de la charge principale.

En ce qui concerne les modes (1, 2 et 3) s'il y'a un surplus de puissance on pourrait faire appel au moyens de stockages comme les batteries pour sauvegarder ce surplus et l'utiliser ultérieurement, ou l'attribuer directement a des charges dérivatives s'il y'en a.

Concernant le 4ème mode s'il y'a une puissance générée sachant qu'elle n'est pas assez pour alimenter notre charge, on pourrait toujours ajouter la batterie si l'état de charge est supérieur a l'état min si non, on pourrait toujours alimenté les charges supplémentaires.

IV.3.1.Stratégie de gestion à base de règles floues

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.

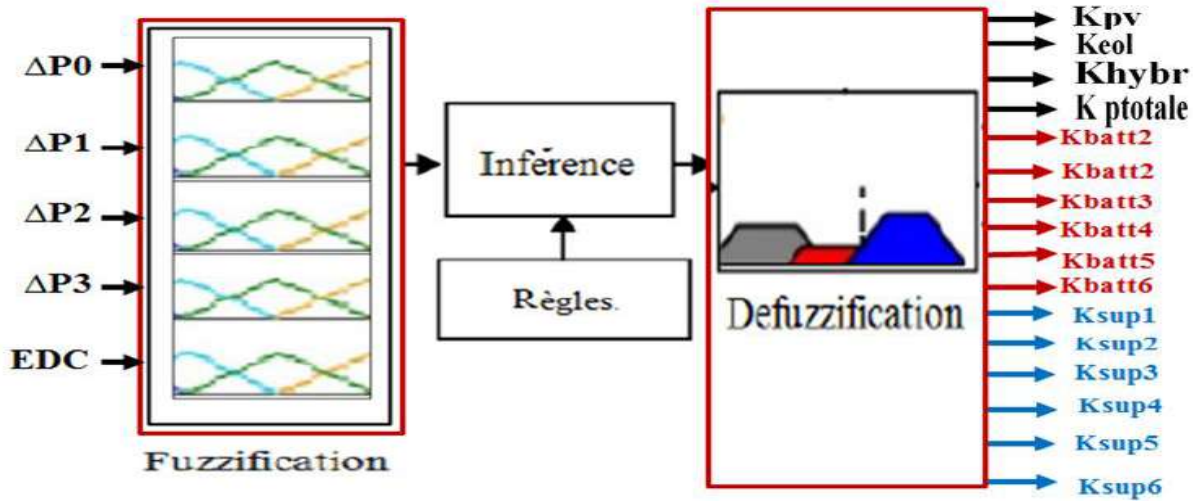


Figure IV.4. Système de supervision à base de la logique floue.

IV.3.1.1.Mise en œuvre du système flou

Le contrôleur flou adopté pour la gestion de l'énergie utilise cinq variables d'entrées qui sont : **ΔP0, ΔP1, ΔP2, ΔP3** et l'état de charge **EDC**. Les variables de sortie du système étant les signaux de commande des interrupteurs :

- **Kpv**: interrupteur alimenté la charge par la puissance Ppv seulement;
- **Keol:** interrupteur alimenté la charge parla puissance Peol seulement;
- **Khybr :** interrupteur alimenté la charge parla puissance Phybr ;
- **Kptotale :** interrupteur alimenté la charge parla puissance (Phybr + Pbatt) ;
- **Kbatt1 :** interrupteur charge la batterie par la puissance Ppv ;
- **Kbatt2 :** interrupteur charge la batterie par la puissance Peol ;
- **Kbatt3 :** interrupteur charge la batterie par la puissance Phybr ;
- **Kbatt4 :** interrupteur charge la batterie par la puissance Phybr-Pch ;

- **Kbatt5 :** interrupteur charge la batterie par la puissance Ppv-Pch ;
- **Kbatt6 :** interrupteur charge la batterie par la puissance Peol-Pch ;
- **Ksup1 :** interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance Ppv ;
- **Ksup2 :** interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance Peol ;
- **Ksup3 :** interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance Phybr ;
- **Ksup4 :** interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance Phybr-Pch ;
- **Ksup5 :** interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance Ppv-Pch ;
- **Ksup6 :** interrupteur alimenté la charge supplémentaire par la puissance Peol-Pch ;

IV.3.1.2.Choix des fonctions d'appartenance

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 **ΔP**, L'état de charge de la batterie et l'état des interrupteurs (k) sont montrées respectivement dans les figures IV.5, IV.6 , IV.7, IV.8.

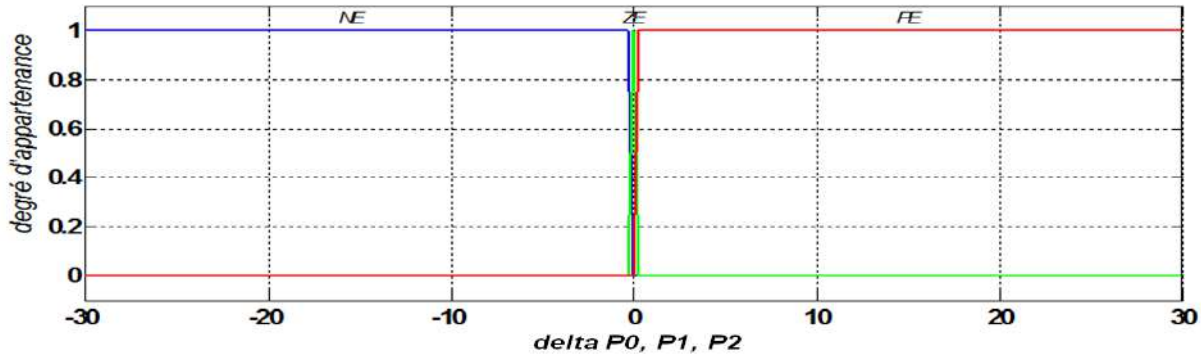


Figure IV.5. Fonctions d'appartenance de delta P0, P1, P2

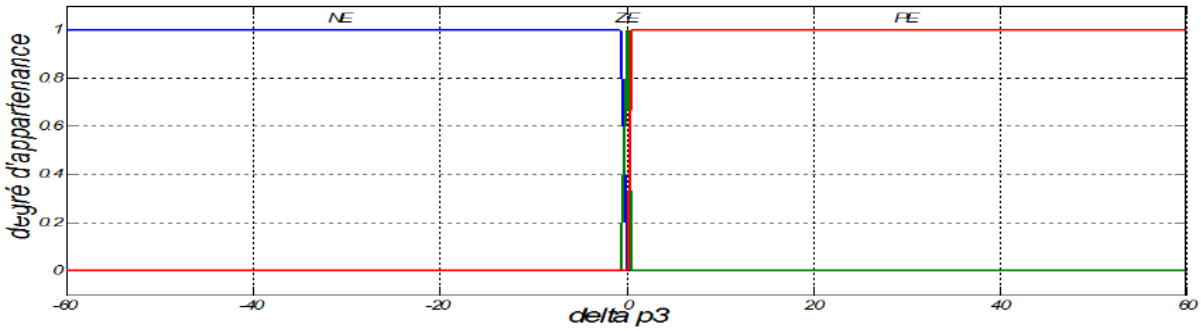


Figure IV.6. Fonctions d'appartenance de delta P3.

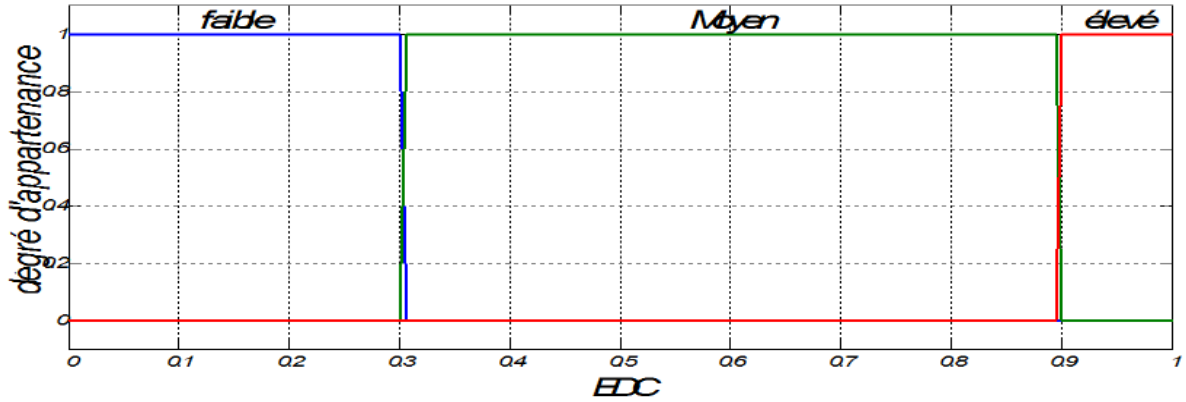


Figure IV.7. Fonctions d'appartenance d'EDC

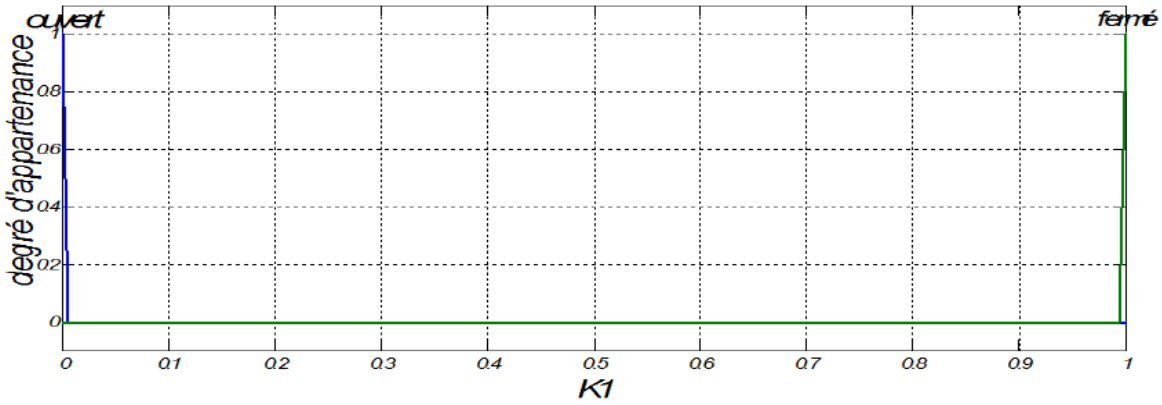


Figure IV.8. Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie.

IV.3.1.3 Choix des règles d'inférences

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.

IV.4. Interprétation des résultats obtenus par la simulation

Le but de ce projet est d'alimenter un poste à soudé utilisé pour soudé des pipelines situé dans une région isolé à Adrar le sud d'Algérie, 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) d'Adrar pendant la durée d'une année [45] [46].

On est ensuite passé à la 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 :

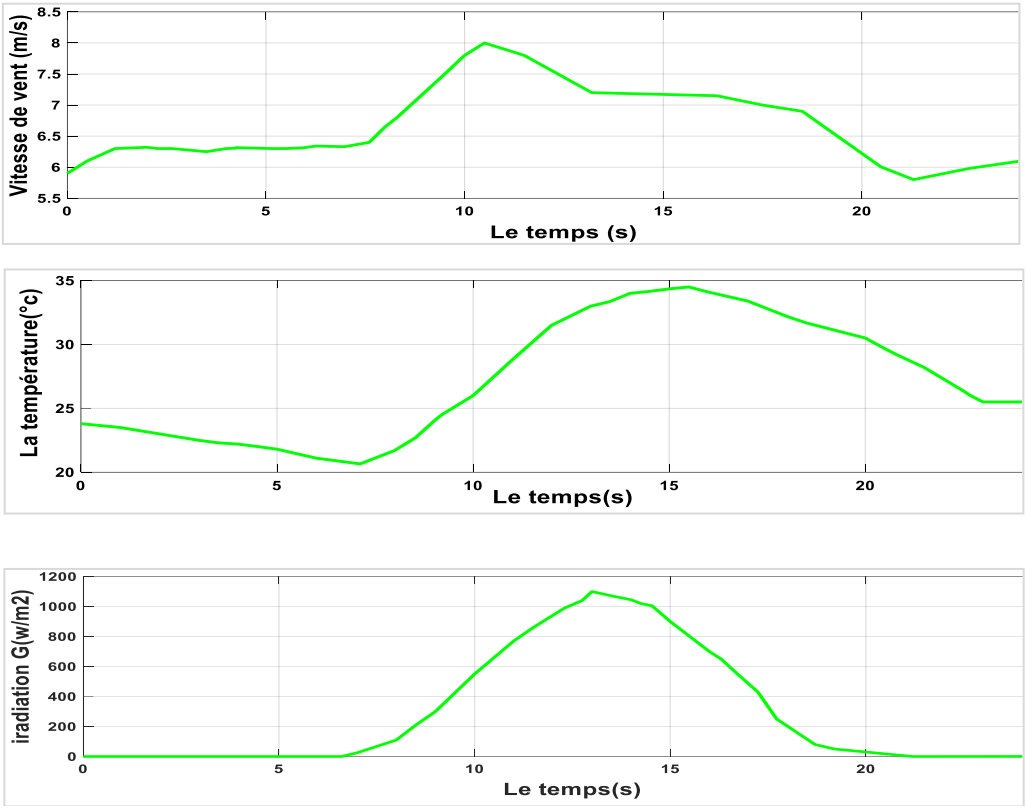


Figure IV.9. Evolution des données d'entrée (irradiation, température et vent).

Puis, nous avons fixé l'état de charge de la batterie à 50% et le courant de charge de référence à 150A afin de tester les différents modes de fonctionnement possibles du SEH. Les principaux résultats de ce test sont représentés dans les figures suivantes:

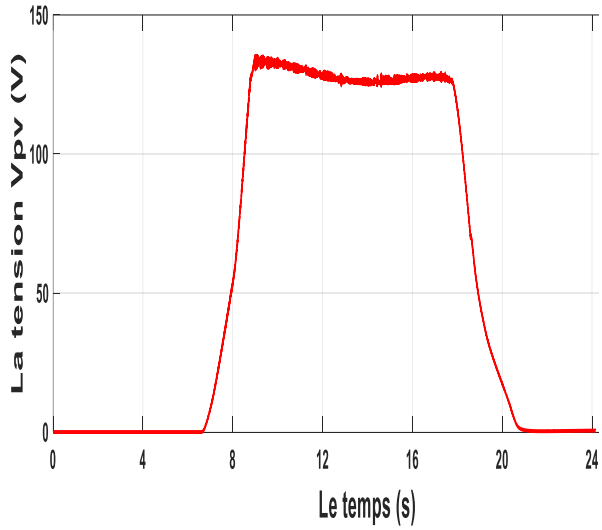


Figure IV.10. Evolution de la tension Vpv

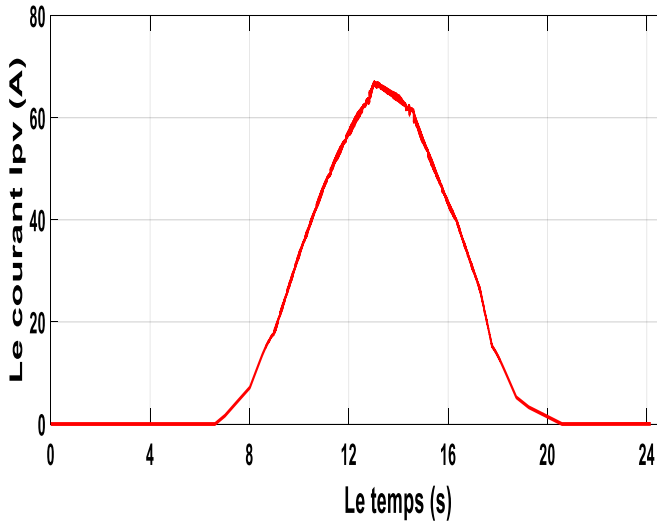


Figure IV.11. Evolution de courant Ipv

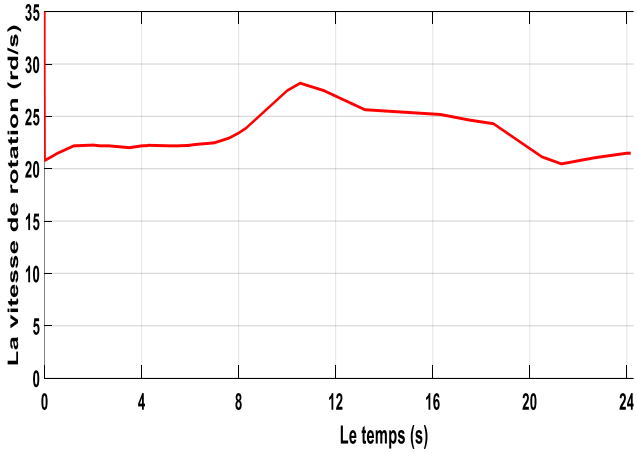


Figure IV.12. Evolution de la vitesse de rotation (rd/s)

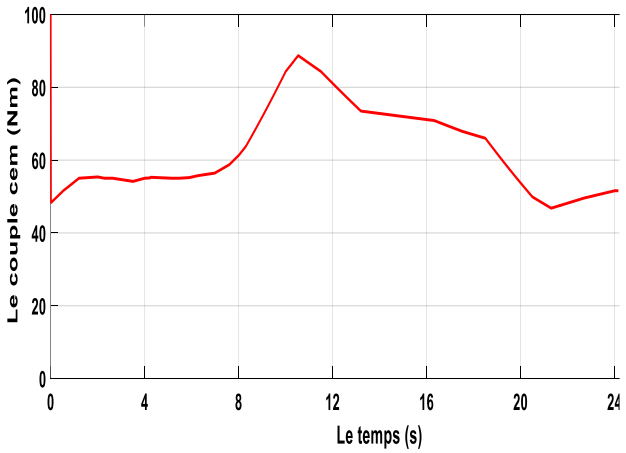


Figure IV.13. Evolution de couple Cem

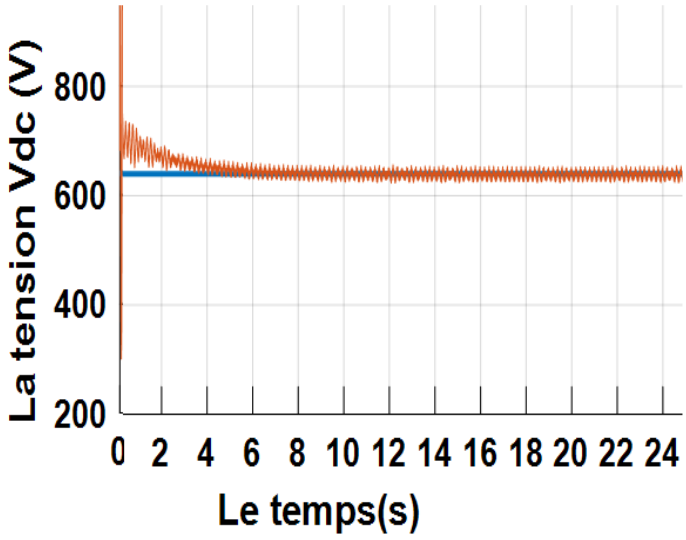


Figure IV.14. Evolution de la tension Vdc

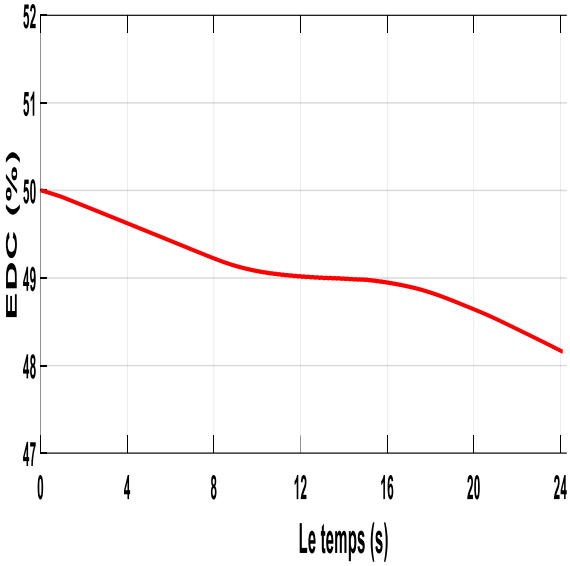


Figure IV.15. Evolution d'EDC.

La tension du bus continu est parfaitement régulée, on voit bien sur la figure **(IV.14)** que la tension V_{dc} suit la tension de référence.

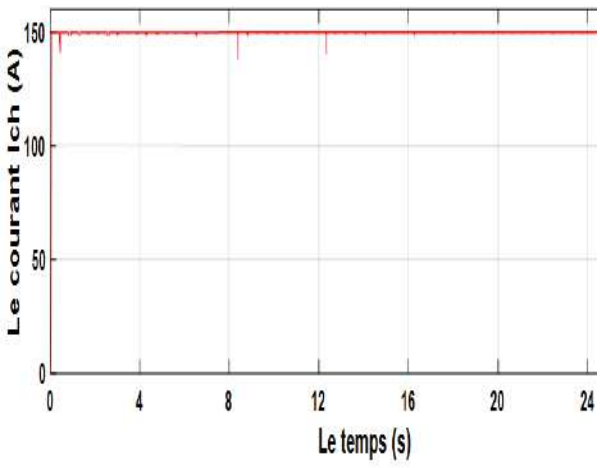


Figure IV.16. Evolution de courant de charge

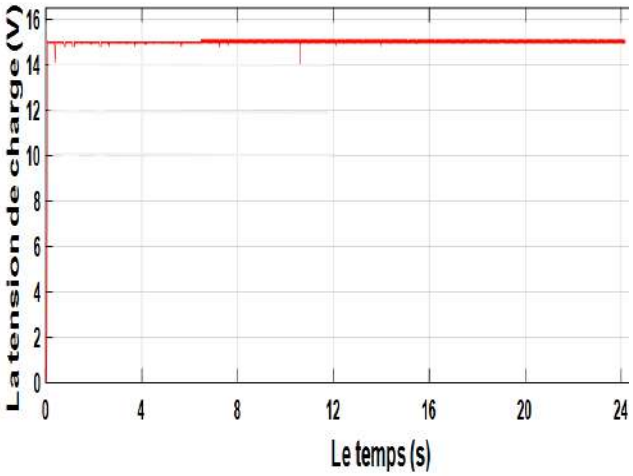


Figure IV.17. Evolution de la tension de charge

Pour la régulation de la charge, on voit bien sur la figure **(IV.16) et la figure (IV.17)** que le courant de charge Ich suit Le courant de charge de référence à une valeur de 150A, et la tension de la charge est 150V.

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.

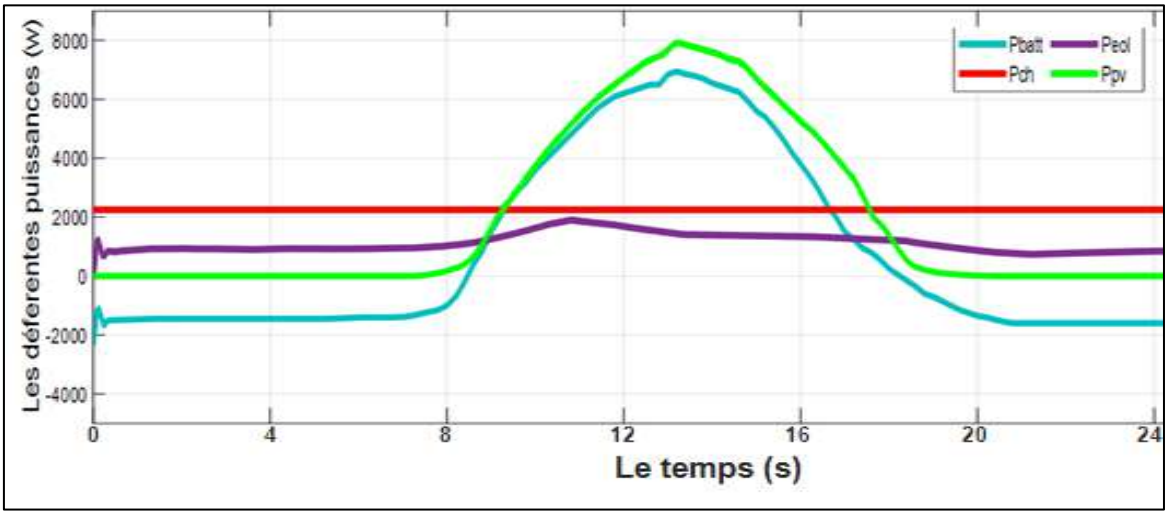


Figure IV.18. Profile de Pch, Ppv, Peol et P batt

❖ **Figures des différents modes**

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

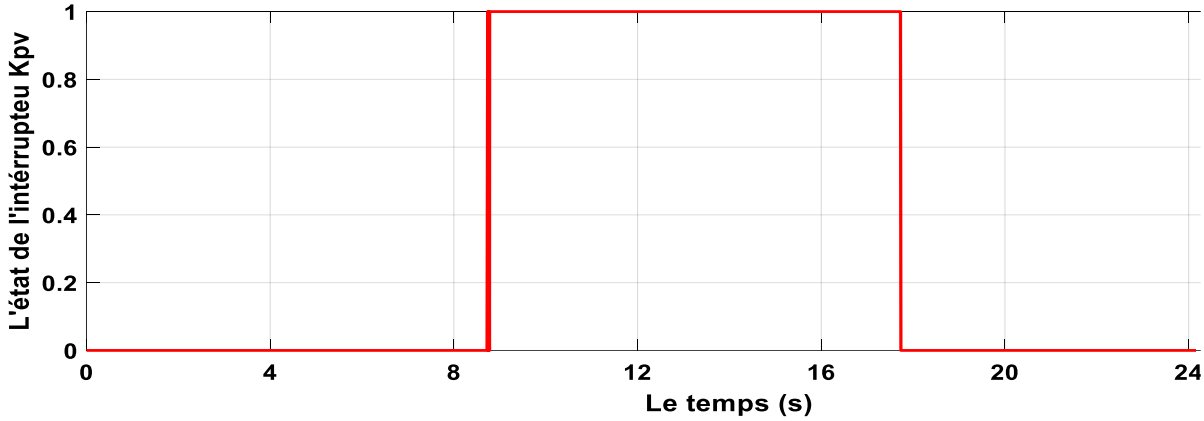


Figure IV.19. L'état d'interrupteur photovoltaïque.

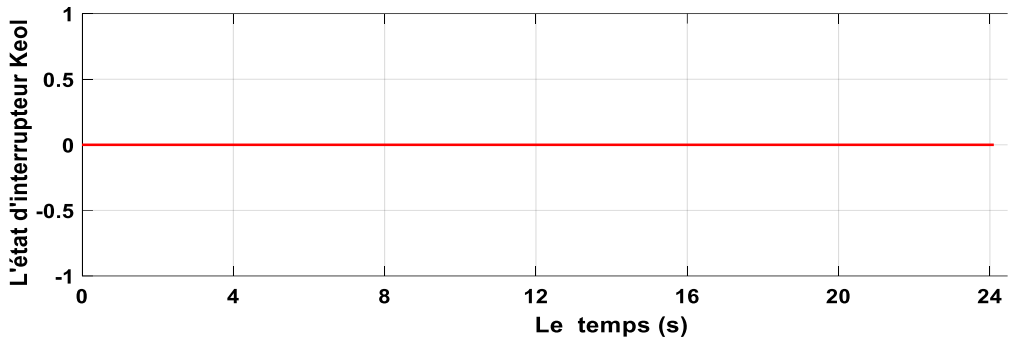


Figure IV.20.L'état d'interrupteur éolien

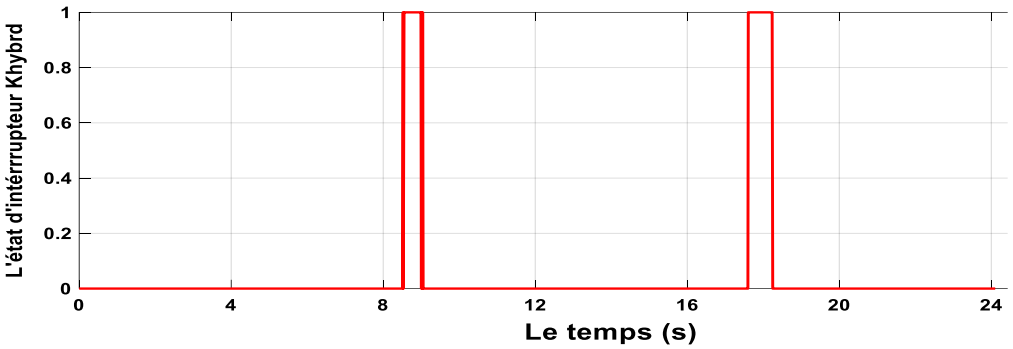


Figure IV.21.L'état d'interrupteur hybride

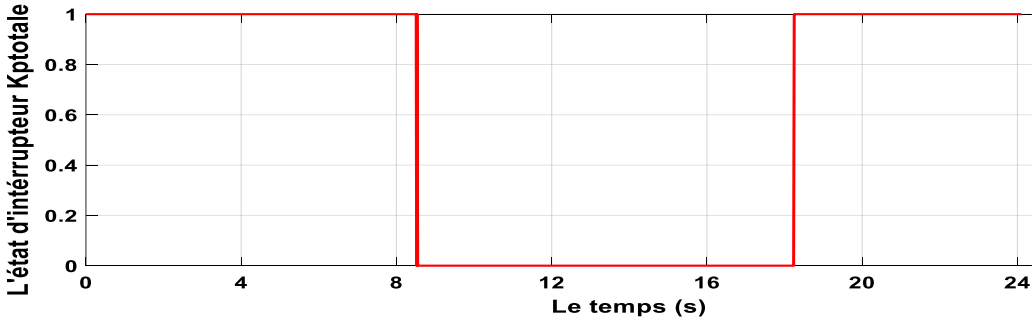


Figure IV.22.L'état d'interrupteur hybride et la batterie

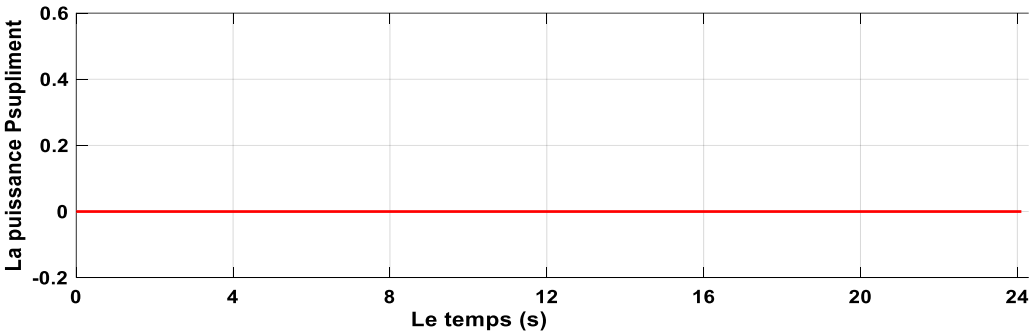


Figure IV.23. Puissance supplémentaire (P supliment)

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

• **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%) ≥EDC ≥ EDCmax (90%), dans ce cas pour satisfaire la charge, la batterie se décharge.

Phase 2

• **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 (IV.15), donc la batterie seront charger par le surplus.

Phase 3

• **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

• **t** = [18.1–18.35] : comportement identique aux phases 2

• **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 (Psup) est nulle.

Conclusion

Dans ce chapitre, la gestion d'énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride: PV, éolien et la batterie, est assurée par une stratégie de gestion à base de règles déterministes floues. Les résultats de simulations obtenues sous diverses conditions permettent de conclure que la supervision de la gestion a été validée avec succès et la charge est toujours alimentée.

Conclusions Générales

L'objectif principal de ce travail était de développer un algorithme de gestion d'énergie d'un système hybride autonome : photovoltaïque/éolien et une batterie afin d'alimenter une charge isolée sans interruption, en adoptant une charge principale (un poste à soudé onduleur) et des charges auxiliaires dans la région d'Adrar au sud d'Algérie.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons fixé des objectifs auxiliaires qui ont tous été atteints. En effet, nous avons commencé ce travail de recherche par une introduction générale, où nous avons identifié les problématiques trouvés dans un SEH à base des ERs. Un état de l'art sur les systèmes multi-sources a été effectué, ensuite, nous avons exposé d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre SEH : le système photovoltaïque, le système éolien, les batteries avec les convertisseurs. Enfin, nous avons donné des généralités sur le soudage à arc [1].

Nous avons aussi établi les modèles mathématiques qui décrivent le comportement des différentes parties du SEH. Le logiciel Matlab/Simulink, a été utilisé à cet effet. Afin d'optimiser l'énergie produite par les sources d'ER (PV et éolien), nous avons adopté des algorithmes MPPT, un processus de la charge/décharge de la batterie et la régulation de courant de la charge. Nous considérons quelques tests de simulation sous environnement Matlab. Les résultats obtenus nous permettent de valider ces commandes. Finalement, nous proposons une stratégie de gestion à base de règles déterministes floues, qui permettent de :

- Assurer la demande de la charge sans interruption ;
- Protéger les batteries contre les charges excessives et les décharges profondes ;

Le présent travail est loin d'être achevé, en perspective plusieurs points très intéressants peuvent être, entre autre envisageable ;

- Ajouts d'un système stockage (surcapacités, PAC…) ;
- Ajout d'autres sources d'énergies ;
- Des commandes plus élaborées des convertisseurs statiques, notamment les régulateurs PI flou/ Flou adaptatif ;

Références bibliographiques

[1] 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.

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

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

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

[6] B. Fellah, " Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité ". Application aux Sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen ,2012.

[7] D. Rekioua, Wind Power Electric Systems: Modeling, Simulation and Control. 2014.

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

[9] A. Labouret, Energie solaire photovoltaique ,2eme édition, dunod , 2005.

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

[11] S.Mezzai, K. Tadjine, "Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) ". Mémoire de Master en Energies renouvelable, Université A. Mira, Bejaia, Algérie 2015.

[12] S.Vighetti, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion". Thèse Doctorat, Université de Gronoble, 2010.

[13] H. Belghitri,"Modelisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque". Mémoire de Magister en Physique Energétique et Matériaux, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen 2010.

[14] Y. Yousfi, L. Touahria, "Gestion de puissance d'un système hybride (Photovoltaïque-Eolien) ". Mémoire de Master en électrotechnique, Université A. Mira, Bejaia, 2018.

[15] 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.

Références bibliographiques

[16] 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.

[17] O. Guerri, "Recherche et Développement L'Energie éolienne en Algérie : Un bref aperçu," EnergiesRenouvelables,no.5,p.14,2008,doi:https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber37_6_7.pdf.

[18] K. Ferkous, "Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne". Mémoire de Magister en Physique, Université Mentouri, Constantine, 2009.

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

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

[21] I. Meghlaoui, "Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal". Mémoire de Magister en électromécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2009.

[22] 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.

[23] 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.

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

[25] 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.

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

[27] A. Akachat, "Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque", Mémoire de Master en fabrication mecanique, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, 2018.

[28] E. Le Guen," Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique", Thèse Doctorat en Sciences Pour l'Ingénieur, Université de bretagne-sud, 2010.

[29] I. Benchadli," Détermination des différents critères de qualité des joints soudés sur les pipelines en service", Mémoire de Master En Génie Mécanique, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2017.

[30] O. GERGAUD, " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse Doctorat, l'école normale supérieure de cachan, 2002.

[31] N.Cherfia, " Etude d'une Chaine de Conversion de l'Energie Eolienne ", Thèse Doctorat en Sciences, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.

[32] A. Tebbal, M.Sekhri," Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent ", Mémoire de MASTER en Electrotechnique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2019.

[33] 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.

[34] 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.

[35] 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.

[36] M. E. Haque, et al, "A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator," Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc., 2008, doi: 10.1109/08IAS.2008.374.

[37] P. Tritschler, " Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédié à l'application agricole ", Thèse Doctorat en Génie Electrique, UNIVERSIT´E DE GRENOBLE, 2010.

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

[39] 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.

[40] C. Feroudj, A. Bensadi, " Gestion d'énergie d'un système hybride à énergies renouvelables en fonctionnement autonome avec Stockages ", Mémoire Master en Energies Renouvelables, Université A. Mira, Bejaia, Algérie 2019.

[41] B.Madaci, et al, "Maximum Power Point Traking Technical Based on," no. 3, pp. 40–45, 2017.

[42] https://www.dropbox.com/s/taowv0vv2yab8v1/Price Info.docx?dl=0.

[43] 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.

[44] https://www.soudeurs.com/site/quelle-est-la-technologie-d-un-poste-souder-type-onduleur-ou-inverter-529/.

[45] S. Diaf and G. Notton, "Technical and economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in Algeria," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 19, pp. 37–51, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.026.

[46] R. Maouedj, et al , "Techno-economic Analysis of a Standalone Hybrid Photovoltaic-wind System. Application in Electrification of a House in Adrar Region," Energy Procedia, vol. 74, pp. 1192–1204, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.762.

ANNEXES.

Paramètres des composants du SEH

1. Panneau PV (KC200GT) en conditions standard (Gn= 1000W/m2, et Tn=25C°)

Puissance maximale	Pmax	200 W
Tension de circuit-ouvert	Voc	32.9 V
Courant de court-circuit	Isc	8.21 A
Courant de saturation de la diode	Isat	9.8214.10-8 A
Photo-courant	Iph	8.214 A
Résistance série	Rs	0.221 Ω
Résistance parallèle	Rp	415.405 Ω
Facteur d'idéalité de la diode	α	1.3
Nombre de cellules PV connectées en série	Ns	54

2. Système éolien

Caractéristiques électriques du Turbine éolienne

Rayon de la turbine	R	2.3 m
Frottement	f	0.000425 N.m/ rd. s^{-1}
Moment d'inertie	j	0.0022 Kg. m²
Nombre de pales	N	3
Masse volumique d'air	ρ	1.225 Kg/m^3
Coefficient optimal	Kopt	1.67*10-3 Nm/ (rad/s)^2
Vitesse du vent nominal	V	12 m/s

Paramètres de la MSAP

Paires de pôles	P	6
Résistance statorique	Rs	0.425 Ω
Flux efficace	Ø	0.433 Wb
Inductance statorique	Ls	8.5 mH
Puissance nominale	Pn	8.5 kW

3. Paramètres de la batterie plomb-acide

Tension	Vn	24V
Capacité nominale	Cn	65Ah
Résistance	Rbatt	0.3Ω