**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**



**F**aculté de **T**echnologie

Thèse de doctorat en sciences

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Automatique

## *Thème*

# *Contribution a la commande d'un système hybride PV/Eolien pour des applications de soudage à l'arc*

Directeur de thèse :

- Pr. MOUALDIA Abdelhafidh

Présenté par :

- Mr. MAHDAB Salim

## ملخص

تتطلب أنشطة اللحام في المواقع البعيدة دون الوصول إلى الشبكة الكهربائية ، عادة محطة لحام مجهزة بمولد ديزل لإنتاج الكهرباء (تسمى مجموعة اللحام) ، إلا أن هذه المعدات تطرح العديد من المشاكل وهي التكلفة ، ونقل الوقود ، والصيانة ، الضوضاء والتلوث وقصر العمر. في هذه الأطروحة ، تم إجراء دراسة معمقة حول جدوى استبدال مجموعة الديزل بنظام هجين مستقل ، والذي يتكون من الأنظمة: الكهروضوئية (PV) ، والرياح ، ونظام التخزين من أجل تغذية محطة اللحام تقع في منطقة أدرار جنوب الجزائر ، على عدة جوانب: النمذجة والتحكم والإدارة والمحاكاة. تعتبر أنظمة الطاقة الكهروضوئية والرياح من المصادر الرئيسية ، بينما يتم استخدام البطارية كمصدر احتياطي ، من ناحية أخرى ، يتم استخدام الأحمال الإضافية لاستهلاك الطاقة الزائدة المتاحة عند شحن البطارية بالكامل. تم اقتراح إستراتيجية إدارة غامضة حتمية قائمة على القواعد للتحكم في النظام المستقل متعدد المصادر المقترح.

تم تقديم نماذج ومحاكاة للأنظمة الكهروضوئية وأنظمة الرياح مع تطبيق تحكم MPPT لتعظيم خرج الطاقة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن النظام الهجين المصمم يمكن أن يوفر تيار لحام ثابتًا حتى في ظل الظروف المترولوجية المتغيرة. تثبت هذه النتائج أيضًا كفاءة النظام المقترح.



## Résumé

Les activités de soudage dans les sites isolés sans accès au réseau électrique de distribution, généralement exigent un poste à souder équipé d'un groupe électrogène diesel pour produire de l'électricité (appelé groupe de soudage).Or, cet équipement pose beaucoup de problèmes à savoir, le coût, et le transport du carburant ,la maintenance, le bruit, la pollution et la faible durée de vie. Dans cette thèse, une étude approfondie a été faite sur la faisabilité du remplacement du groupe diesel par un système 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 utilisée comme une source de secours, par contre les charge auxiliaires sont utilisées 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 montrent que le système hybride conçu peut fournir un courant de soudage stable, même dans les conditions métrologiques variables. Ces résultats prouvent également l'efficacité du système proposé.



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



## Abstract

Welding activities in remote sites without access to the electrical grid, usually require a welding station equipped with a diesel generator to produce electricity (called welding set).However, this equipment poses many problems namely, the cost, and transportation of fuel, maintenance, noise, pollution and short life span. In this thesis, an in-depth study was made on the feasibility of replacing the diesel group by an autonomous hybrid system, which is constituted by the systems: photovoltaic (PV), wind, and the storage system in order to feed a welding station located in the region of Adrar in the south of Algeria, on several aspects: modeling, control, management and simulation. The PV and wind systems are considered as main sources, while the battery is used as a backup source, on the other hand the auxiliary loads are used to consume the excess power available when the battery is fully charged. A fuzzy deterministic rule-based management strategy is proposed to control the proposed autonomous multi-source system.

Modeling and simulation of the PV and wind systems have been presented with application of MPPT control to maximize the power output. The obtained results show that the designed hybrid system can provide stable welding current even under the variable metrological conditions. These results also prove the efficiency of the proposed system.



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

# *Remerciements*

***L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse ont été effectués sous la direction du Professeur Abdelhafidh MOUALDIA. Je tiens a lui exprimer mes plus vifs remerciements et ma profonde et respectueuse reconnaissance pour son suivi, ses compétences ,disponibilités et encouragements ;ainsi que ses conseils avisés tout au long du déroulement de ce travail.***

***Ma profonde gratitude a Monsieur Nadir KEBACHE Maitre de conférence a l'Universite Yahia Fares de MEDEA, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.***

***Je tiens a exprimer mes sincères remerciements a Monsieur Abdelkader YOUSFI et Youcef BOT tout les deux Maitre de conférence a l'Université Djilali Bounaama Khemis Milana, pour l'intérêt qu'ils ont porté a ce travail et pour avoir accepté de participer au jury.***

# *Dédicaces*

***Je dédie ce travail a :***

- ***A la mémoire de mes parents***
- ***A ma femme et mes enfants***
- ***A toute ma famille***
- ***A tous mes amis***

# Table des matières

*Remerciements*.....
*Dédicaces* .....
Résumé.....
*Liste des figures* .....
*Liste des tableaux* .....

Introduction Générale ..... 1
Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes de production d'énergie hybride ..... 5
I.1. Introduction ..... 5
I.2. Etat de l'énergie Renouvelable en Algérie ..... 5
I.2.1. Energie solaire en Algérie ..... 6
I.3. Généralités sur les systèmes électriques hybrides (SEH) ..... 7
I.3.2. Classifications des systèmes d'énergies hybrides : ..... 8
I.3.3. Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH) ..... 9
I.3.3.1. Architecture à bus continu (CC) ..... 9
I.3.3.2. Architecture à bus alternatif AC ..... 10
I.3.3.3. Architecture mixte à bus à CC/CA ..... 11
I.3.4. Système hybride étudié (photovoltaïque/éolien/batteries) ..... 11
I.3.5. Avantages et inconvénients du système hybride étudié ..... 11
I.3.5.1. Avantages ..... 11
I.3.5.2. Inconvénients ..... 12
I.4. Généralité sur les différents composants du système hybride étudié ..... 12
I.4.1. Généralités sur les systèmes photovoltaïques ..... 12
I.4.2. Energie solaire ..... 12
I.4.2.1. Rayonnement solaire ..... 13
I.4.2.2. Cellule photovoltaïque : ..... 14
I.4.2.3. Principe de fonctionnement d'une cellule PV ..... 15
I.4.2.4. Types de cellules photovoltaïques (PV) ..... 16
I.4.2.5. Systèmes photovoltaïques ..... 18
I.4.2.6. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque [8] [10] [14] 19
I.4.3. Généralités sur les systèmes éoliens ..... 19
I.4.3.1. Modes d'installation et différents types d'éoliennes ..... 20
I.4.3.2. Notions Théoriques sur L'aérogénérateur ..... 27
I.4.3.3. Machines électriques dans les aérogénérateurs ..... 29
I.4.3.4. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne ..... 31
I.4.3.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [3] [10] ..... 33
I.4.4. Système de stockage ..... 34
I.4.4.1. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb acide ..... 34
I.4.4.2. Caractéristiques des batteries ..... 35
I.4.5. Les convertisseurs statiques ..... 36
I.4.5.1. Convertisseur CA/CC (redresseur) ..... 36
I.4.5.2. Convertisseur CC/CA (onduleur) ..... 36

I.4.5.3. Convertisseur CC/CC (hacheur) ..... 36
I.4.6. Le système de supervision ..... 36
I.5. Généralités sur le soudage ..... 37
I.5.1. Procédés de soudage ..... 37
I.5.2. Soudage à l'arc électrique ..... 38
I.5.3. Les paramètres de soudage ..... 39
I.5.3.1. L'intensité du courant de soudage ..... 39
I.5.3.2. La tension du soudage ..... 40
I.5.3.3. Energie nominale et vitesse de soudage ..... 40
I.5.3.4. Le type de courant de soudage : Alternatif (CA) ou continu (DC). ..... 40
I.5.4. Poste à souder onduleur ..... 40
I.6. Conclusion ..... 41
II. Chapitre 2 : modélisation des composants du SEH ..... 42
II.1. Introduction : ..... 42
II.2. Outils de modélisation ..... 42
II.3. Modélisation de la chaine de production photovoltaïque ..... 43
II.3.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque ..... 43
II.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque ..... 44
II.3.2.1. Courant de court-circuit, ICC ..... 44
II.3.2.2. Tension de circuit ouvert : ..... 45
II.3.2.3. Puissance maximale ..... 45
II.3.2.4. Facteur de forme ..... 45
II.3.2.5. Le rendement : ..... 46
II.3.3. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque ..... 46
II.3.3.1. Caractéristique Courant-Tension ..... 46
II.3.3.2. Caractéristique puissance –tension ..... 46
II.3.3.3. Influence de la température ..... 47
II.3.3.4. Influence de l'éclairement ..... 48
II.3.4. Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST) ..... 49
II.4. Modélisation de la chaine de production éolienne ..... 50
II.4.1. Modélisation de la vitesse de vent ..... 51
II.4.1. Modélisation de la turbine ..... 52
II.4.2. Modélisation du Multiplicateur : ..... 53
II.4.3. Modélisation de l'Arbre Mécanique : ..... 54
II.4.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents ..... 55
II.4.4.1. Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a, b, c) : ..... 55
II.4.4.2. Modèle de la MSAP dans le repère de Park : ..... 56
II.4.4.3. Expression du couple électromagnétique : ..... 58
II.4.4.4. Equations mécaniques : ..... 58
II.4.5. Modélisation du redresseur PD3 à diodes ..... 58
II.5. Modélisation de la batterie ..... 59
II.5.1. Modèle R-C ..... 59
II.5.2. Le modèle ≪ CIEMAT ≫ ..... 60

II.5.3. Modélisation du hacheur réversible en courant .....61
II.6. Modélisation du bus continu .....62
II.7. Modélisation de l'onduleur triphasé .....62
II.8. Conclusion .....64
III. Chapitre 3 : commande et simulation d'un SEH .....65
III.1. Introduction .....65
III.2. Description des algorithmes MPPT .....65
III.2.1. Commande de la chaine de conversion photovoltaïque .....66
III.2.1.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) .....66
III.2.1.2. Méthode logique floue .....68
III.2.1.3. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque .....70
III.2.2. Commande de la chaine de conversion éolienne .....72
III.2.2.1. La commande en couple. .....73
III.2.3. Simulation de la chaine de conversion éolienne .....76
III.3. Contrôle de la tension Vdc du bus DC par le système de stockage .....79
III.3.1.1. Boucle de régulation de la tension Vdc .....80
III.3.1.2. Simulation du bus continu. .....82
III.4. Stratégies de commande MLI de l'onduleur .....82
IV. Chapitre 4 : Gestion et simulation du SEH appliquée au poste à soudé onduleur .....85
IV.1. Introduction .....85
IV.2. Différentes modes de fonctionnement du système hybride .....86
IV.3. Système de supervision du SEH .....88
IV.3.1. Stratégie de gestion à base de règles floues .....92
IV.3.1.1. Mise en œuvre du système flou .....92
IV.3.1.2. Choix des fonctions d'appartenance .....93
IV.4. Interprétation des résultats obtenus par la simulation .....96
IV.5. Régulation du courant de poste onduleur .....103
Conclusion Générale .....106
Références bibliographiques .....108
Annexes .....109

# *Liste des figures*

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

**Figure I.1.** Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie. ..... 5
**Figure I.2.** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol [25].. ..... 7
**Figure I.3.** Systèmes hybrides ..... 8
**Figure I.4.** Classification des systèmes hybrides [5] ..... 8
**Figure I.5.**Configuration du système hybride à bus CC. ..... 10
**Figure I.6.** Configuration du système hybride à bus alternatif. ..... 10
**Figure I.7.** Configuration du système hybride à deux bus à CC et CA. ..... 11
**Figure I.8.**La composition du soleil. ..... 12
**Figure I.9.**Les deux types d'énergie solaire. ..... 13
**Figure I.10.** Rayonnement solaire transmis à la terre ..... 14
**Figure I.11.**Structure d'une cellule photovoltaique ..... 15
**Figure I.12.** Cellule photovoltaïque monocristalline/ poly-cristalline ..... 16
**Figure I.13.** Cellule amorphe ..... 17
**Figure I.14.** Cellule, module et panneau photovoltaïque. ..... 18
**Figure I.15.** Moulins à vent. ..... 20
**Figure I.16.** Éolienne de Savonius. ..... 22
**Figure I.17.** Éolienne de Darrieus. ..... 22
**Figure I.18.** Éoliennes à axe vertical : (a) éolienne lente, (b) éolienne rapide. ..... 22
**Figure I.19.** Configuration à axe horizontal. ..... 24
**Figure I.20.** Les composants de l'aérogénérateur. ..... 25
**Figure I.21.** Conversion de l'énergie éolienne. ..... 26
**Figure I.22 .**tube de courant autour d'une éolienne. ..... 27
**Figure I.23.** CP en fonction de λ pour différents types d'éoliennes. ..... 29
**Figure I.24 .**systèmes éoliens basés sur la GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI ..... 31
**Figure I.25.** Caractéristique puissance / vitesse du vent. ..... 32
**Figure I.26.** Batterie au Plomb-acide ..... 34
**Figure I.27 .**Principe de fonctionnement d'une batterie ..... 34
**Figure I.28.**Système de supervision. ..... 37
**Figure I.29.**Classifications des procédés de soudage ..... 38
**Figure I.30 .**Principe de soudage à l'arc électrique. ..... 39

## *Chapitre II : Modélisation des composants du SEH*

**Figure II.1.** Architecture du système d'énergie hybride étudié ..... 43
**Figure II.2.** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV ..... 43
**Figure II.3.** Caractéristique Ipv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque ..... 46
**Figure II.4 .**Courbe Ppv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque. ..... 47
**Figure II.5 .**Influence de la température sur la caractéristique I=f(V). ..... 47
**Figure II.6 .**Influence de la température sur la caractéristique P=f(V). ..... 48
**Figure II.7 .**Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V). ..... 48
**Figure II.8 .**Influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V). ..... 49
**Figure II.9 .**Schéma de principe d'un convertisseur survolteur ..... 49
**Figure II.10.** Modèle mathématique de la vitesse du vent. ..... 52
**Figure II.11.**Caractéristique du coefficient Cp (λ,β) pour plusieurs valeurs de β ..... 53
**Figure II.12.** Le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine. ..... 54
**Figure II.13 .**Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park ..... 56
**Figure II.14.** Schéma du redresseur PD3 à diodes ..... 58

# *Liste des figures*

**Figure II.15.** Modèle R-C de la batterie.....59
**Figure II.16.** Modèle CIEMAT de la batterie. .....60
**Figure II.17.** Hacheur réversible en courant.....61
**Figure II.18** Modèle du bus continu .....62
**Figure II.19** Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux. .....63

## *Chapitre III : Commande et simulation d'un SEH*

**Figure.III.1.**Schéma du SEH global.....65
**Figure III.2.** Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT .....66
**Figure.III.3.** Principe de la MPPT avec la méthode P&O. .....67
**Figure.III.4.** Organigramme de la méthode perturbation et observation (PO). .....67
**Figure III.5.** Structure de base du contrôleur flou MPPT. .....68
**Figure III.6.** Fonctions d'appartenance des entrées : E, CE et de la sortie ΔD .....69
**Figure.III.8.** Profil de l'éclairement.....71
**Figure III.9.** Profil de la température ..... 71
**Figure.III.10.** Principaux résultats du test.....72
**Figure.III.11.**Caractéristiques de voilure dans le plan puissance-vitesse.....73
**Figure.III.12.** Structure de contrôle d'une turbine éolienne.....74
**Figure III.13**. Profil du vent.....76
**FigureIII.14.** Puissance du système éolien.....77
**Figure III.15.**Couple électromagnétique .....77
**Figure III.16** .Vitesse de la turbine.....77
**Figure III.17.**Vitesse spécifique .....78
**Figure III.18**.Coefficient de puissance.....78
**Figure III.19.**Courant : ia, ib et ic de la MSAP. .....78
**Figure III.20.**Courant de sortie du redresseur.....79
**Figure III.21.**Schéma de commande de la tension du bus continu.....80
**Figure III.22.**Structure de contrôle du hacheur réversible en courant .....80
**Figure III.23.**régulation de bus continu.....82
**Figure.III.24.**Principe de la modulation de la largeur d'impulsion M.L.I. .....83
**Figure III.25.**Tension Va de l'onduleur .....83
**Figure III.26.**Principe de la commande ..... 83

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

**Figure IV.1.** Schéma global du système .....85
**Figure IV.2.** Organigramme de gestion qui considère le système de conversion éolien.....89
**Figure IV.3** Organigramme de gestion qui considère le système de conversion .....90
**Figure IV.4.** Système de supervision à base de la logique floue.....92
**Figure IV.5.**Fonctions d'appartenance de delta P0, P1, P2.....93
**Figure IV.6.**Fonctions d'appartenance de delta P3.....94
**Figure IV.7.**Fonctions d'appartenance d'EDC .....94
**Figure IV.8.**Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie. .....94
**Figure IV.9.**Evolution des données d'entrée (irradiation, température et vent). .....97
**Figure IV.10.**Evolution de la tension Vpv .....97
**Figure IV.11.**Evolution de courant Ipv .....98
**Figure IV.12.**Evolution de la vitesse de rotation (rd/s) .....98
**Figure IV.13.**Evolution de couple Cem.....98
**Figure IV.14.**Evolution de la tension Vdc .....99
**Figure IV.15.**Evolution d'EDC.....99
**Figure IV.16.**Profile de Pch, Ppv, Peol et P batt.....100
**Figure IV.17.** L'état d'interrupteur photovoltaïque. .....100

# *Liste des figures*

**Figure IV.18.**L'état d'interrupteur éolien .....101
**Figure IV.19.**L'état d'interrupteur hybride .....101
**Figure IV.20.**L'état d'interrupteur hybride et la batterie .....101
**Figure IV.21.** Puissance supplémentaire (P supliment).....102
**Figure IV.22.** Principe de fonctionnement du poste à soudé onduleur. .....103
**Figure IV.23.** Bloc de régulation du courant de soudage. .....104
**Figure IV.24.** Evolution de courant de charge .....104
**Figure IV.25.** Evolution de la tension de charge.....105

# *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. ..... 9
**Tableau I.2 .**Classification des turbines éoliennes.....23
**Tableau I.3.** Avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable. .....25

## *Chapitre III : Commande et simulation d'un SEH*

**Tableau.III.1.** Table d'inférence du MPPT flou . .....70

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

**Tableau IV.1.** L'état de chaque composant constituant le SEH .....91
**Tableau IV.2.** Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion ( éolien comme source principale). ...91
**Tableau IV.3.** Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion (PV comme source principale).....91
**Tableau IV.4** Système de supervision à base de la logique floue. .....92
**Tableau IV.5.** Table des règles floues pour EDC<30% (faible)..…..95
**Tableau IV.6.** Table des règles floues pour EDC<30% (moyen).. .....95
**Tableau IV.7.** Table des règles floues pour EDC<30% (haut)..…..96

# *Nomenclature*

# *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].**

# Introduction Générale

Les énergies renouvelables, telles que les énergies éolienne et solaire, ont fait l'objet au cours de ces dernières années d'une attention accrue en tant que solution pour affronter les problèmes causées par l'épuisement des énergies fossiles. Ceci permettra d'atténuer les effets des changements climatique et aussi pour répondre a la croissance mondiale de la demande énergétique[1].Dans les sites isolés ,ou le diesel est la seule source d'énergie électrique, ces énergies renouvelables viennent jouer également jouer un rôle très important en tant que solutions alternatives pour remplacer carrément le diesel, ou fonctionner en hybridation avec ce dernier[2].A titre comparatif, l'énergie hybride peut répondre aux besoins énergétiques mieux que le diesel, en raison de son faible cout, de sa propreté et renouvelabilité [3] .

L'activité de soudage qui est l'une des activités industrielles les plus demandées dans les sites isolés, comme le cas de l'Algérie pour le soudage des pipelines, nécessite une alimentation électrique fiable. A cet effet, les fabricants offrent des postes a souder spéciaux ,équipés de groupes électrogènes, généralement de type diesel, pour pouvoir produire de l'électricité au poste a souder .Ce type de machine se trouve sur le marché en plusieurs procédé de soudage, telles que le soudage à a arc à électrode enrobée (SMAW),soudage a arc sous gaz à électrode de tungstène (TIG),soudage à arc sous gaz avec fils-électrode plein(MIG/MAG), etc. [4,5].Tout ces procédés sont accompagnées de système de contrôle avancés[6,7].Cependant, le moteur thermique diesel pose beaucoup de problèmes ,tels que le cout et le transport du carburant, la maintenance, le bruit, la pollution et la courte durée de vie.

**1-Problématique**

La plupart des postes a souder munis de groupes électrogène (souvent appelés groupes de soudage) fonctionnent de manière autonome, ce qui n'exige pas un accès au réseau électrique de distribution [8].C'est pour cette raison, que la majorité de leurs applications se trouvent dans les sites isolés ou ce type de poste est le seul moyen pour faire des activités de soudage. plusieurs procèdes de gammes de puissance sont disponible sur le marché [9].Un groupe de soudage est généralement basé sur un moteur thermique a essence ou diesel, couplé mécaniquement a l'arbre d'une génératrice ou d'un alternateur pour produire de l'électricité. Malgré les progrès important réalisés dans les groupes électrogènes, notamment avec l'apparition des onduleurs (inverter), qui intègrent des convertisseurs statique de puissance pour produire une qualité d'électricité tolérable [10], les problèmes majeurs restent les même, à savoir :

- Le groupe électrogène doit toujours être surdimensionné (généralement à plus de 200%) pour couvrir les surcharges importantes durant la procédure de soudage à l'arc [13].
- La dépendance au carburant ; un petit groupe de 4KW consomme une moyenne de 1,9 l/heure pour un moteur a essence, et 0,9 pour le diesel.
- Le transport du carburant qui est un sérieux problème pour les régions éloignées.
- La fréquence élevée des interventions d'entretien et de maintenance sur le moteur thermique.
- Autres problèmes, comme la pollution de l'environnement par les huiles et les gaz à effet de serre (GES), le bruit et la courte durée de vie.

Ceci a poussé de chercher un système plus performant avec un minimum de contraintes mécaniques et environnementales. Pour cela, la problématique de recherche dans cette thèse est concentrée sur la source d'alimentation des postes de soudage [6].Le système hybride proposé dans cette thèse peut être une solution très intéressante pour remplacer totalement le groupe électrogène.

**2-objectifs**

Avec le développement intensif des technologies des énergies renouvelables ,telle que l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque, le diesel et/ou l'essence ne reste plus la seule et unique source énergétique pour la production de l'électricité dans les sites isolés comme avant[11,12,6]. L'objectif principal de cette thèse est d'examiner par simulation Matlab/Simulink la faisabilité d'utiliser un système hybride industrielle de petite taille a base de GSAP et de panneaux photovoltaïque GPV pour construire un générateur de soudage destiné aux sites isolés. Une illustration de ce système est donnée par la figure 1.Une telle solution est également proposée pour diversifier les ressources énergétiques, d'augmenter la faisabilité d'alimentation électrique et de garantir une bonne qualité de fourniture [12,13].Nous avons opté pour l'éolienne a vitesse variable et un générateur photovoltaïque (GPV), munies d'un fonctionnement a maximum de puissance (MPPT), afin d'obtenir une conversion optimale de l'énergie [10,14].Le problème de la fluctuation de la production éolienne est résolu par trois système à savoir :

- Un ensemble de batterie de stockage pour satisfaire la demande de l'arc en cas d'insuffisance ou d'absence de la puissance hybride.

- Un système de régulation de l'angle de calage des pales, pour limiter la puissance a sa valeur nominale en cas des vitesses élevées.
- Un système de supervision pour une gestion de l'énergie du système hybride global appliqué au poste à souder à arc.
- Un système de dissipation d'énergie a travers une résistance de puissance, afin de consommer l'excès d'énergie dans le cas ou les batteries sont chargées.

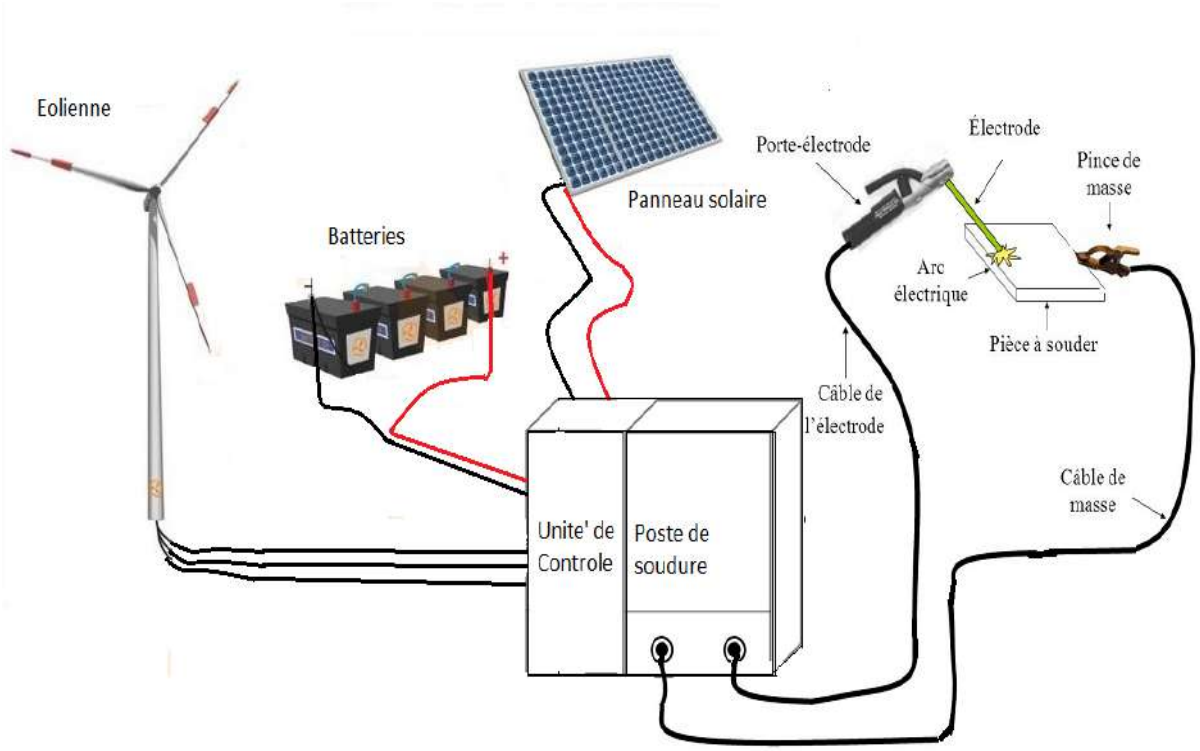



Figure 1 : Illustration d'un poste de soudage à l'arc à base d'un système hybride

**3-Structure de la thèse**

Pour présenter ce travail de thèse, nous avons organisé le manuscrit en quatre chapitres qui sont :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les systèmes d'énergie hybride autonome où un état de l'art des sources éoliennes et solaires en Algérie sera présenté. Ensuite, nous abordons les différentes architectures des systèmes électriques multi-sources. Puis nous donnons une étude descriptive des sources d'énergie qui composent notre système. 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 par un algorithme basé sur l'utilisation de la logique floue pour une gestion de l'énergie du système hybride global appliqué au poste à souder à arc.

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

# Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes 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 [3].

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 [3].

Dans le présent chapitre nous allons présenter d'une manière générale les systèmes hybrides. Nous donnons l'état des sources d'énergie renouvelable en Algérie 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. À la fin de ce chapitre nous présentons un état de l'art sur le soudage à arc.

## I.2. 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 [13].

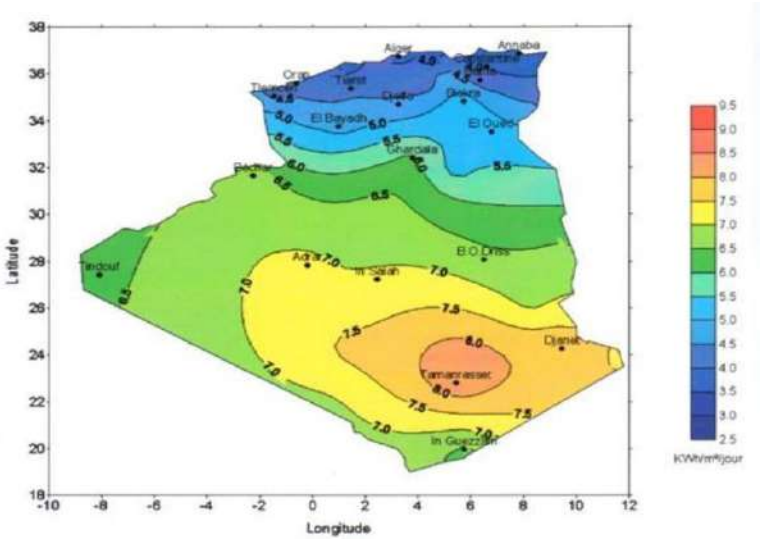



**Figure I.1.** Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie.

L'Algérie s'est engagée a travers la société Sonelegaz, depuis 2011 sur la voie des énergies renouvelables par la mise en place de deux centrales pilotes expérimentales en juin 2014, à savoir la centrale photovoltaïque de 1,1 MW de Ghardaïa et la centrale éolienne de 10,2 MW de Adrar [1].Ceci afin de développer les énergies renouvelables a grande échelle dans le moyen terme. En effet ,la nouvelle mouture du programme national de développement des énergies renouvelables revoit à la hausse les capacités de production a partir de sources renouvelables en les portant à 22.000 MW sur la période 2015-2030 au lieu de 12.000 MW ,comme arrêtes dans le précédent programme de 2011 [1].

Les filières solaires photovoltaïque et éolien sont particulièrement privilégiées. Sur ce programme, un volume de 354 MW a été réalisé sur la période 2014-2016, soit un parc de production d'origine renouvelable mis en service de 379 MW [30].

L'état algérien a lancé 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 [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.2.1.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'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 3200 heures 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 [25].

### I.2.2.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) comme présentée dans la Figure I-2.

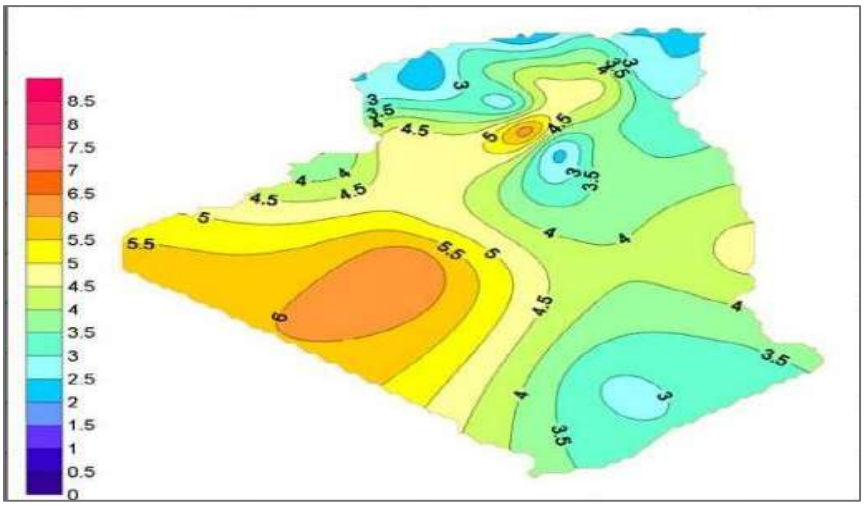



**Figure I.2 .**Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol [25].

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

### I.3.1.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.3.** Systèmes hybrides

### I.3.2.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.3) ci dessous.

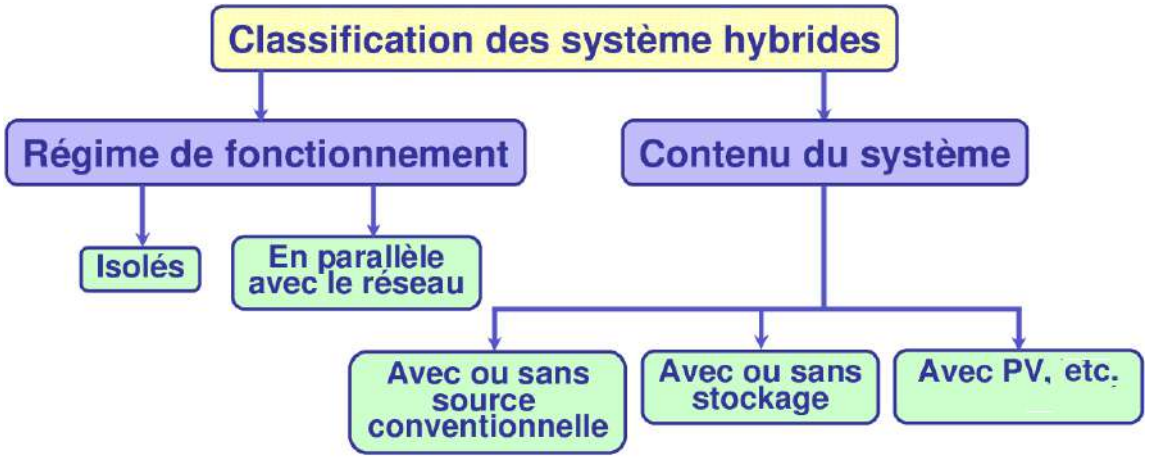



**Figure I.4.** Classification des systèmes hybrides [5].

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 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]

### I.3.3.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.3.3.1.Architecture à bus continu (CC)

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.4), 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].

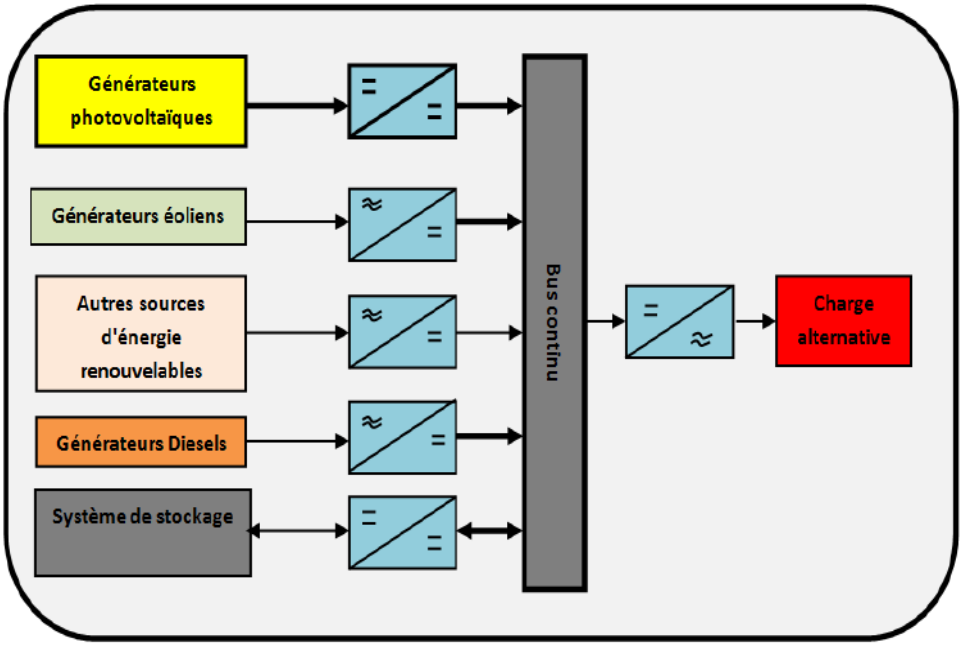



**Figure I.5.**Configuration du système hybride à bus continu.

### I.3.3.2.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.5). 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].

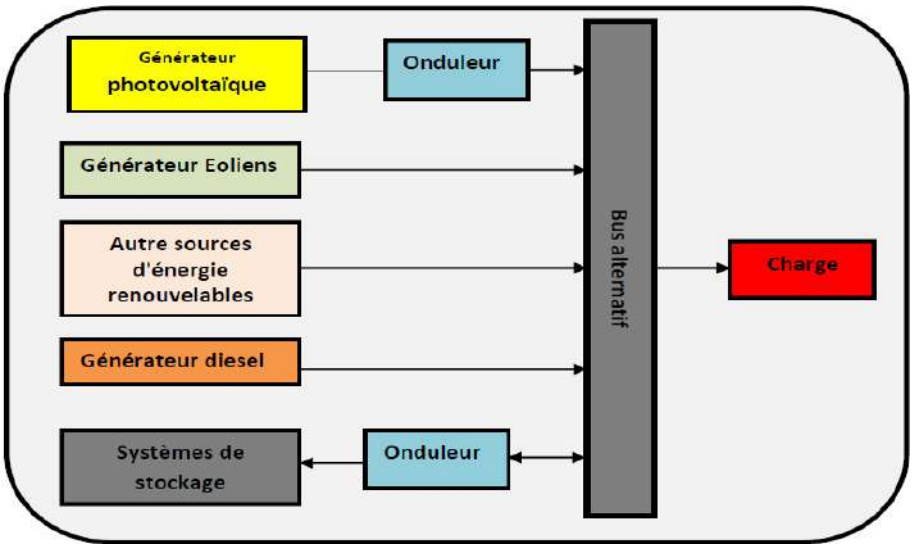



**Figure I.6.**Configuration du système hybride à bus alternatif.

### I.3.3.3.Architecture à bus mixte

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la figure (1-6).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].

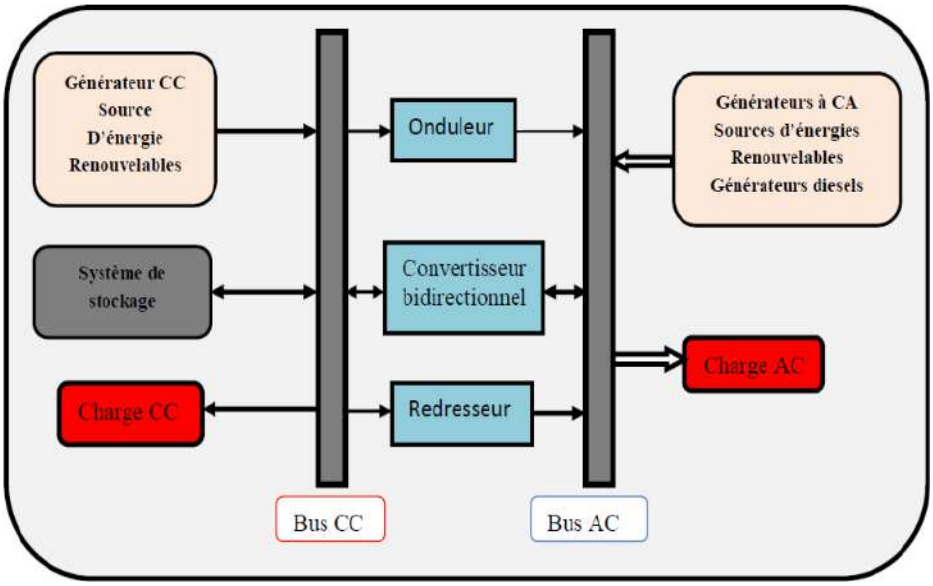



**Figure I.7.**Configuration du système hybride à deux bus à CC et CA.

### I.3.4. 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.3.5.Avantages et inconvénients du système hybride étudié

#### I.3.5.1.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 réduit [5].

#### I.3.5.2.Inconvénients

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

### I.4. Généralité sur les différents composants du système hybride étudié

#### I.4.1.Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [5]. Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre.

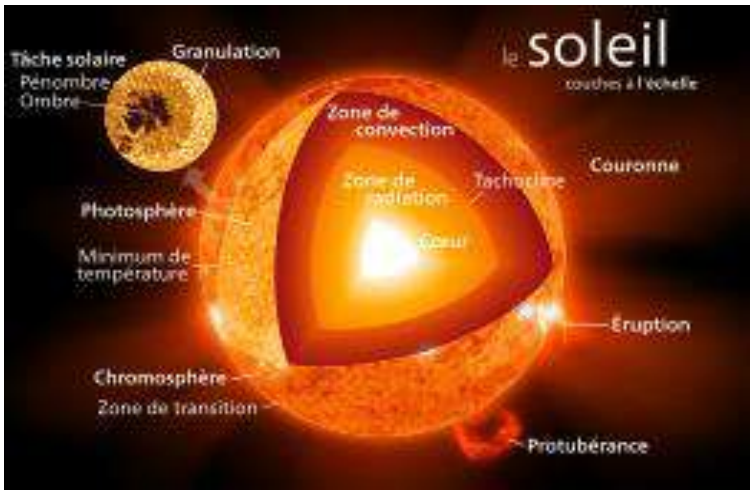



**Figure I.8.** La composition du soleil .

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuerons dans ce chapitre un bref rappel sur l'énergie solaire, Le rayonnement solaire, cellule photovoltaïque et ses performances, et à la fin les avantages et les inconvénients de cette énergie.

#### I.4.2. Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à

effet de serre et sa matière première le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde.

Il existe différents types d'énergies solaires :

- L'énergie solaire thermique : Ce type d'énergie est produit à partir de panneaux solaires thermiques posés sur le toit de la maison pour capter la chaleur du soleil.
- L'énergie solaire thermodynamique : L'énergie solaire thermodynamique, quant à elle, est produite par des centrales solaires à concentration. Cet équipement est composé de miroirs avec des fluides caloporteurs et d'un générateur d'électricité solaire. Tout comme les panneaux solaires thermiques, ces miroirs transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire en chaleur, mais à une température considérablement plus élevée. Cette dernière peut, d'ailleurs, aller de 250 à 800° en fonction des techniques utilisées. La chaleur ainsi obtenue va, ensuite, être convertie en énergie électrique en activant le turboalternateur.
- l'énergie photovoltaïque : Énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

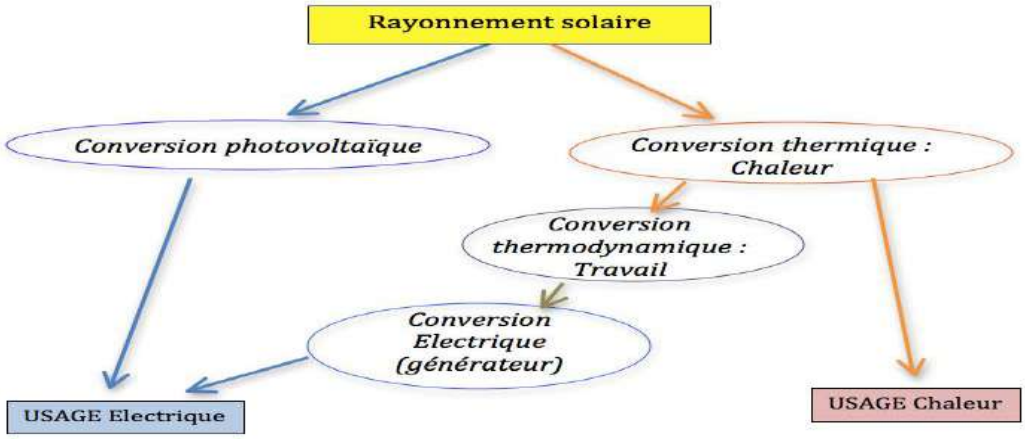



**Figure I.9.**Les types d'énergie solaire [8].

### I.4.2.1.Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 µm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 µm) [6].

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie véhiculée par ce rayonnement, correspond à un éclairement de 340 W/m². Un bilan énergétique montre que sur cette quantité d'éclairement environ 100 W/m² sont réfléchis vers l'espace, seul le reste est absorbé. [7].

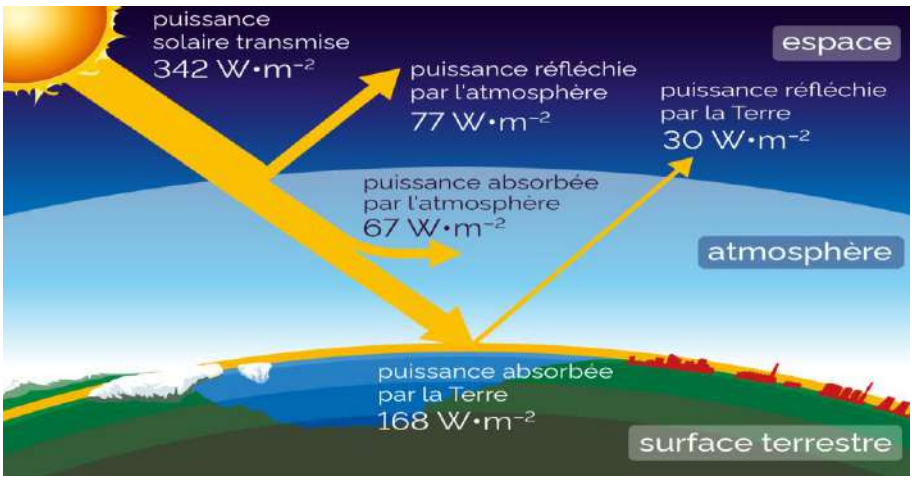



**Figure I.10.** Rayonnement solaire transmis à la terre.

En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivant:

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude).
- la saison.
- l'heure.
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité…) , l'altitude du lieu.

### I.4.2.2.Cellule photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : photos (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Une cellule photovoltaïque ou (cellule solaire, photopile) est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique .La structure la plus simple de ce dispositif est assimilable à une diode photosensible basée sur des matériaux semi-conducteurs qui exploite l'effet photovoltaïque [9], c'est-à-dire transformé directe l'énergie portée par la lumière en électricité.

### I.4.2.3.Principe de fonctionnement d'une cellule PV

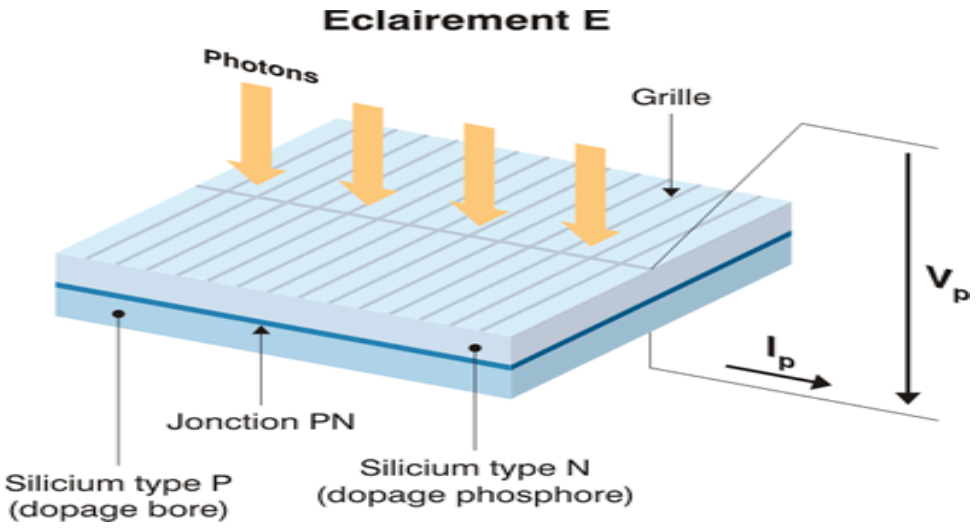



**Figure I.11.**Structure d'une cellule photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Une cellule PV peut donc être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "excitée" par les photons constituants la lumière, sous l'action de cette excitation, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés". Ce principe est illustré sur la figure I.11. Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique, sinon les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible qui varie entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [10].

Afin d'effectuer la collecte du courant électrique, des électrodes en forme de grille sont déposés sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure permet le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroitre la quantité de lumière absorbé. [11].

### I.4.2.4.Types de cellules photovoltaïques (PV)

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. En dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double.

- La cellule au silicium monocristallin :

La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un silicium formé d'un seul cristal qui ordonné, offre le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce .Elle a comme avantage un bon rendement, de 16 à 19 %, et un nombre de fabricants élevé. Le silicium monocristallin est le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite.

- Cellules au silicium poly-cristallin (ou multi-cristallin) :

Le silicium poly-cristallin, aussi couramment appelé poly-silicium ou poly-Si est une forme particulière du silicium, ont en général un rendement compris entre 12 et 14%, Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin. Le silicium poly-cristallin est constitué de multiples petits cristaux de tailles et de formes variées.

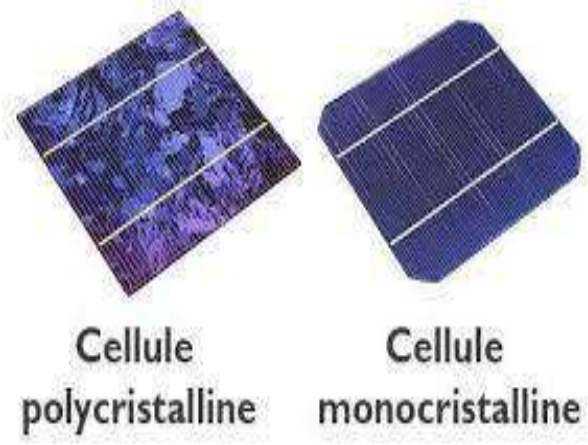



**Figure I.12.**Cellule photovoltaïque monocristalline/ poly-cristalline.

- Cellules au silicium amorphe :

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées avec un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Ces cellules ont des rendements limité (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m² pour obtenir 1kWc).

Cette technologie est pratique car utilisable sur de nombreux supports et elle peut fonctionner sous un faible ensoleillement.

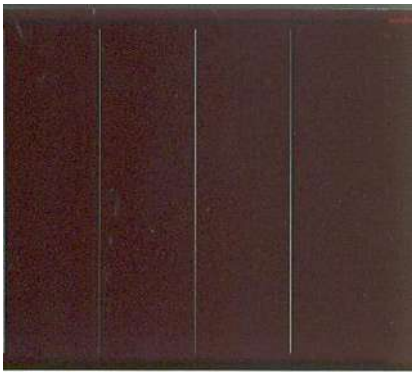


**Figure I.13.**Cellule photovoltaïque amorphes.

- Cellules utilisant d'autres matériaux que le silicium :

Ce sont également des cellules à couches minces, elles peuvent être fabriquées à partir de matériaux divers : di séléniure de cuivre et d'iridium (CIS), tellurure de cadmium (CdTe).Elles ont des rendements compris entre 7 et 11%.

### I.4.2.4.1. Association des cellules photovoltaïques (Le module photovoltaïque)

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Pour obtenir des niveaux de puissance compatible avec le matériel usuel de telles cellules sont associées formant ainsi des modules PV.

Un ensemble de cellules qui est constitué souvent de (36 ou 72 cellule), forme un module solaire. Dans un module, les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire (voir la figure I.13).

Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure [12].

Le terme générateur photovoltaïque **GPV** est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier.

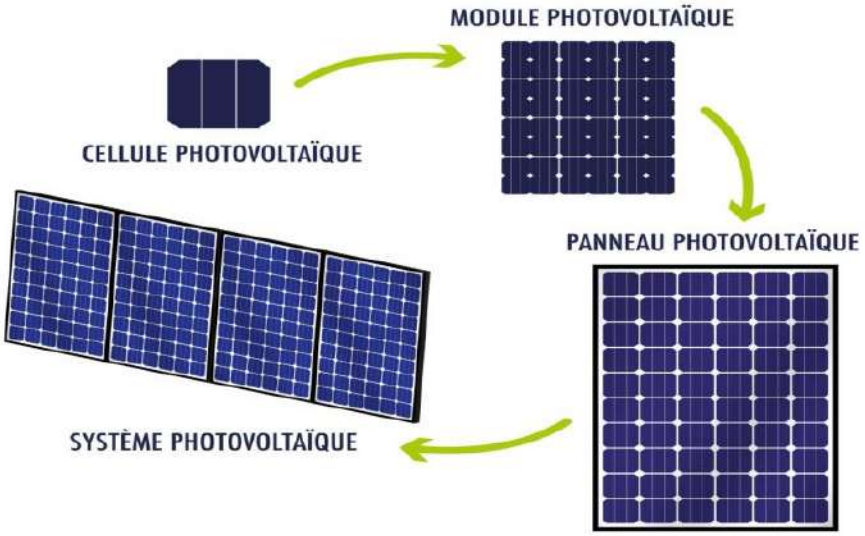



**Figure I.14.**Cellule, module et panneau PV.

### I.4.2.5.Systèmes photovoltaïques

#### I.4.2.5.1.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.4.2.5.2.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 créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement

emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

#### I.4.2.6.Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque [8] [10] [14]

##### I.4.2.6.1.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 taille relative, 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.4.2.6.2.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.4.3.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. 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.. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [16].



**Figure I.15.** 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].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.4.3.1.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.4.3.1.1.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.4.3.1.1.1. 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 (Figure I.18) :

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

**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.18) 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].

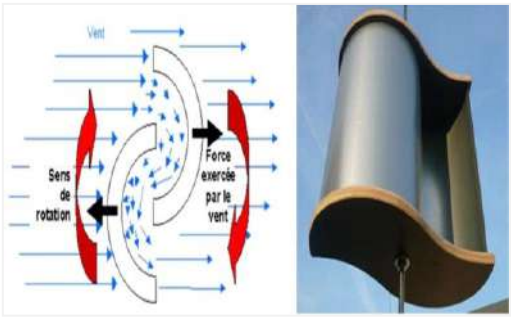



**Figure I.16.** Éolienne de Savonius.

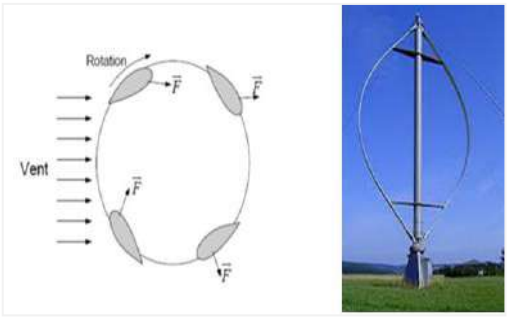



**Figure I.17.** Éolienne de Darrieus.

#### I.4.3.1.1.2. 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.1.19). 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] :




**Figure I.18.** Éoliennes à axe horizontal : (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 multi-pales 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.

**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.2 propose 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 encore 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 ».

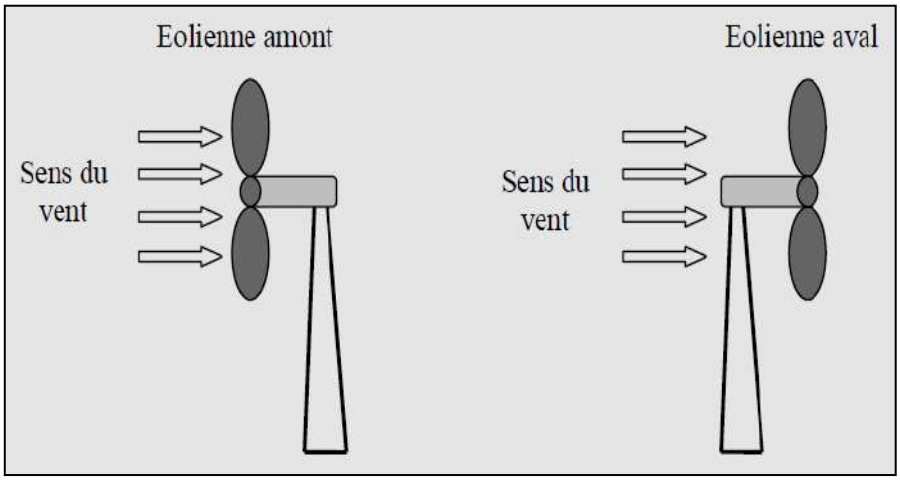



**Figure I.19.** Configuration à axe horizontal.

**I.4.3.1.2.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.3 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.<br>• Faible coût de construction et maintenance | • Rendement de conversion faible<br>• Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci<br>• Fluctuation importante de la puissance |
| Vitesse variable | • Fort rendement de conversion énergie<br>• Puissance électrique de meilleure qualité<br>• Stress mécanique réduit | • Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs<br>• Contrôle du système plus compliqué |

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

### 1.4.3.2. Architecture d'un aérogénérateur

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

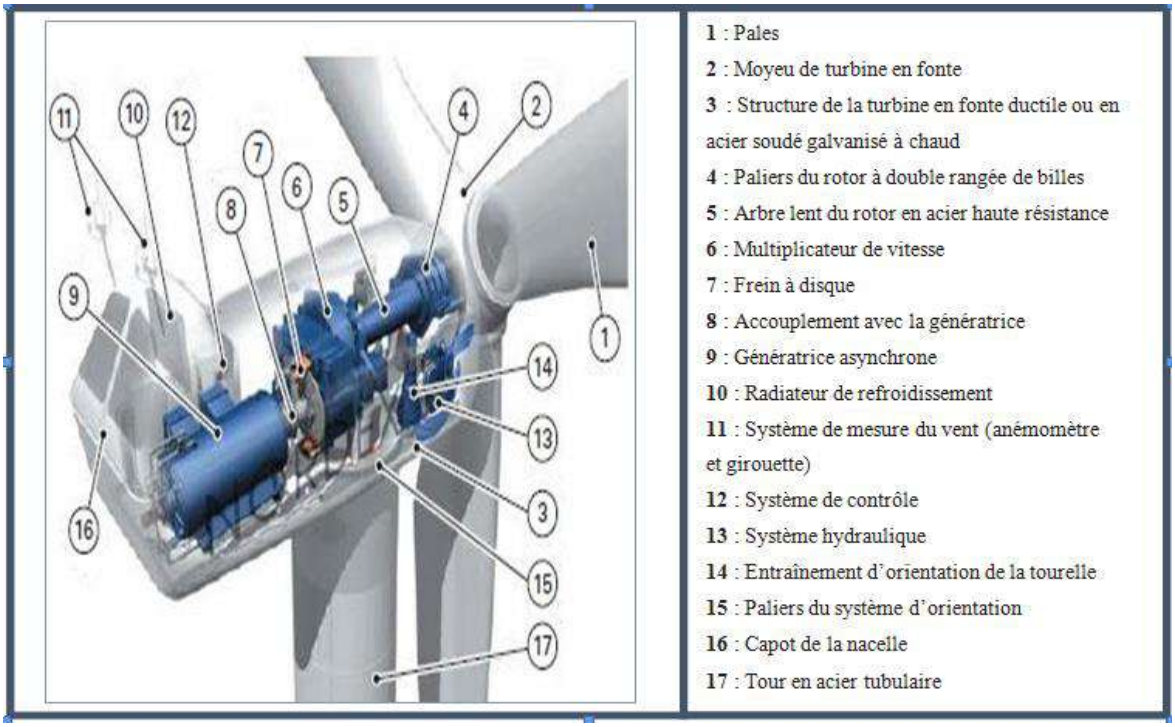



**Figure I.20.** Les composants de l'aérogénérateur [14].

**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 le rotor éolien au générateur électrique. Les éléments regroupés sont :

- **Multiplicateur :** il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- **Le système de refroidissement :** il se compose généralement d'un ventilateur électrique 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.

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique(Figure 1.22).

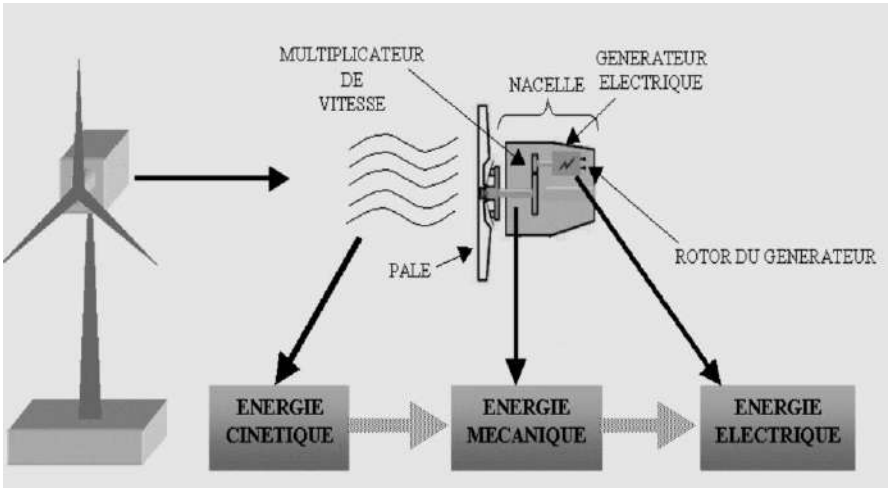



**Figure I.21.** Conversion de l'énergie éolienne [10].

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.

### I.4.3.2.Notions Théoriques sur L'aérogénérateur

#### I.4.3.2.1.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.**

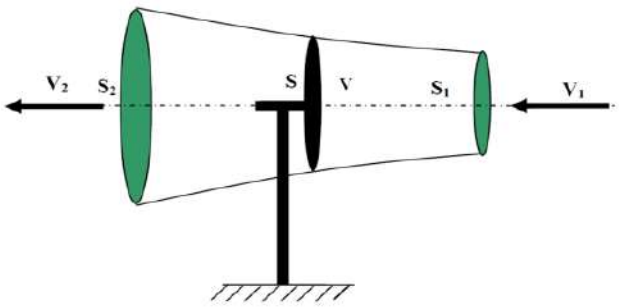



**Figure I.22 .**Tube de courant autour d'une éolienne [8].

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant (Figure 1.22).

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.4.3.2.2.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] :

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

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:

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

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

On peut définir le coefficient Cp comme étant le rapport :

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

On en déduit le couple produit par l'éolienne.

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

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

**I.4.3.2.3.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 :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad \textbf{(I.4)}$$

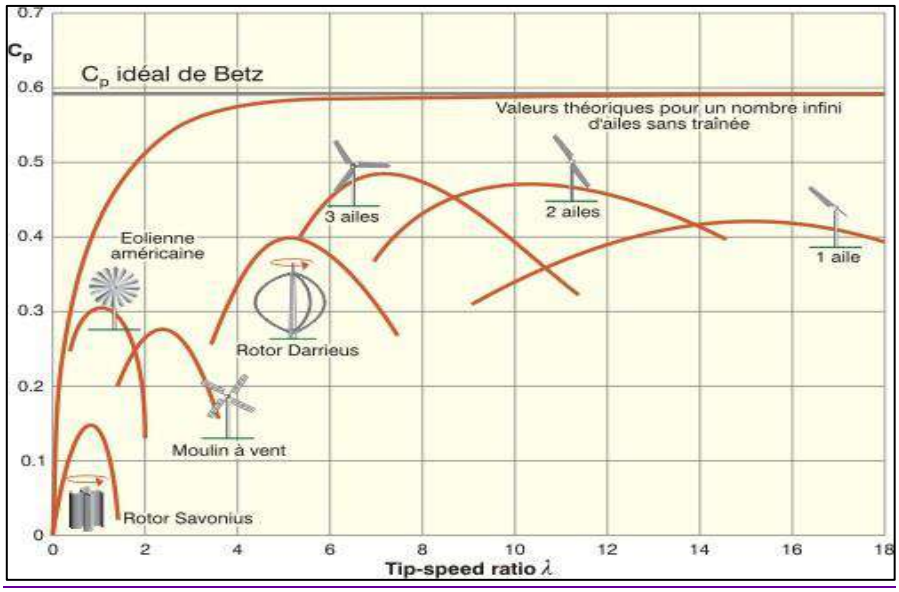



**Figure I.23.** CP en fonction de λ pour différents types d'éoliennes [20].

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.4.3.3.Machines électriques dans les aérogénérateurs

**L**es 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 elles, et on s'intéressera d'avantage à la machine synchrone à aimant permanent.

#### I.4.3.3.1.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.4.3.3.2.Machine synchrone**

**A. Générateur synchrone à rotor bobiné**

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité [21]. 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.23, 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].

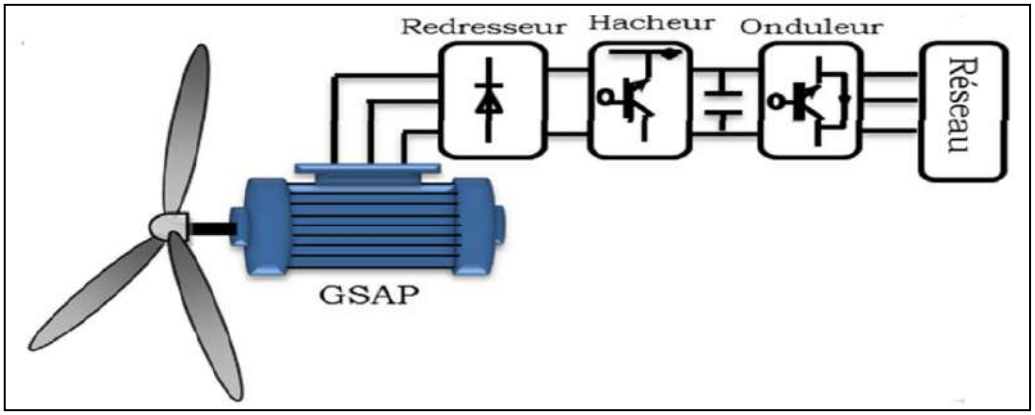



**Figure I.24.**systèmes éoliens basés sur la GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI.

### I.4.3.4.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 V$n$, la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et

structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas $Pn$ 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 1.25) [5].

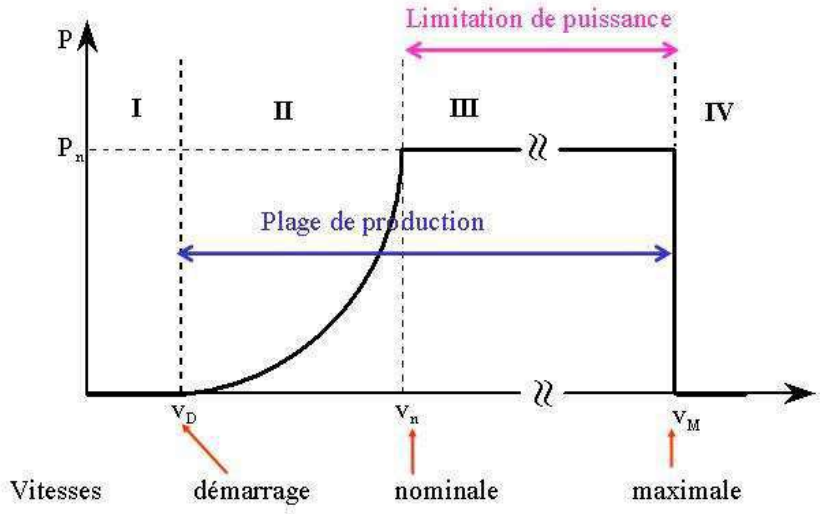



**Figure I.25.** Caractéristique puissance / vitesse du vent [14].

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 Pturbine fournie 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.4.3.5.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [3] [10]

#### I.4.3.5.1.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.4.3.5.2.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.4.4.Système de stockage

Le stockage d'énergie est un facteur clé dans un système d'énergie hybride en site isolé, étant donné le caractère aléatoire et variable dans le temps des énergies renouvelables. De nos jours, les technologies les plus émergentes dans les SEH sont les technologies électrochimiques et principalement les systèmes de stockage d'énergie à batterie [1].

Les batteries construites 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.26.** Batterie au Plomb-acide

#### I.4.4.1.Fonctionnement d'un accumulateur au plomb acide

La batterie plomb acide est un système électrochimique capable de restituer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte (voir figure 1.27).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].

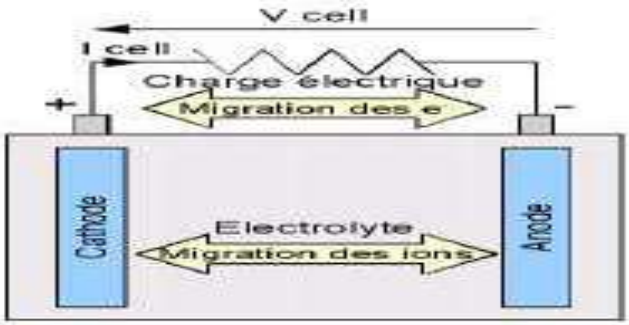



**Figure I.27 .**Principe de fonctionnement d'une batterie [23]

$$Pbo_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{Décharge}}{\overset{\text{Charge}}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + 2H_2O \quad \textbf{(I.5)}$$

$Pbo_2$ 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.4.4.2.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.4.5.Les convertisseurs statiques

#### I.4.5.1.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.4.5.2.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.4.5.3.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.4.6.Le système de supervision

Un système de supervision est une entité dotée d'une intelligence lui permettant de gérer d'une manière efficace les interactions entre les différents éléments d'un système hybride. Il représente le cerveau du système hybride, il décide de l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries) en fonction de la demande de la charge et en fonction de la disponibilité des

énergies renouvelables [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. [8].

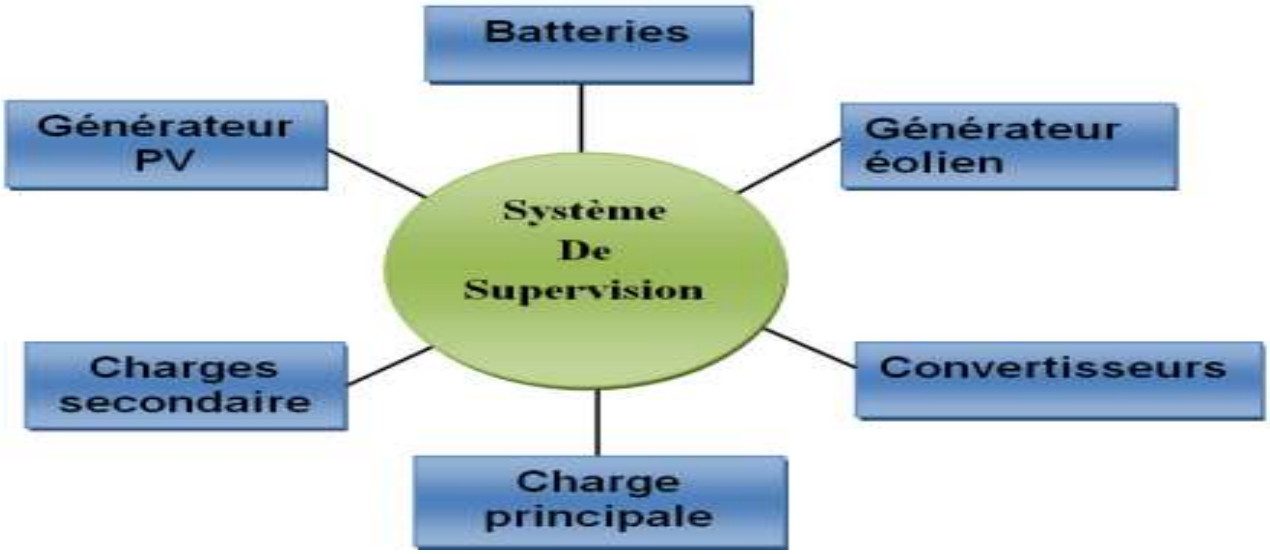



**Figure I.28.**Système de supervision [16].

## 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 transfert d'énergie comme présenté dans la figure I.31.

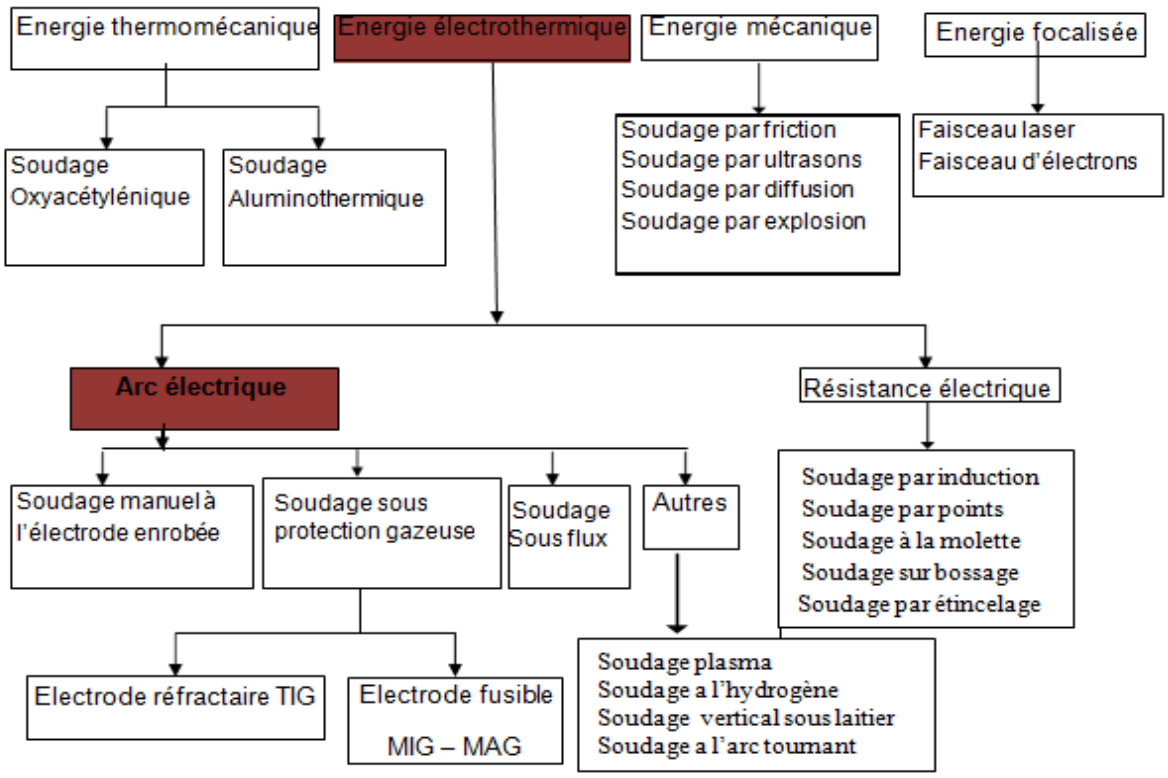



**Figure I.29 .**Classifications des procédés de soudage [28]

### I.5.2.Soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est 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. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

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. (Figure I.30).

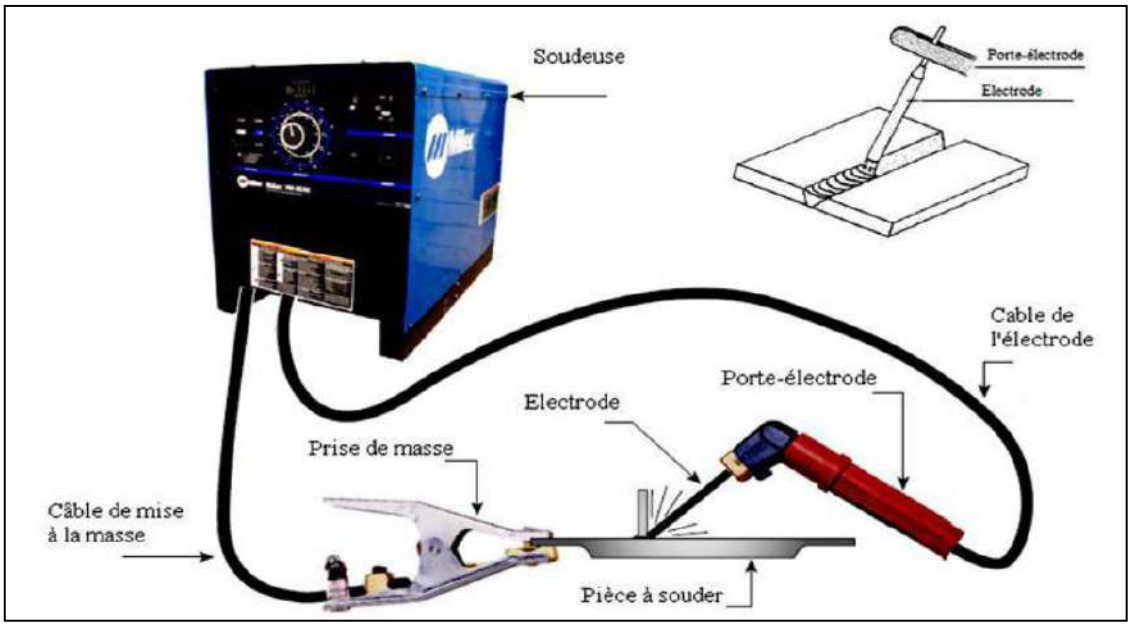



**Figure I.30 .**Principe de soudage à l'arc électrique [27].

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]:

$$Tension = (0.04\ x\ Intensité) + 21 \quad \textbf{(I.9)}$$

### 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 :

$$En = \frac{U.I}{V} \quad \textbf{(I.10)}$$

La vitesse de soudage est la vitesse d'avancement de l'électrode le long de la ligne à soudée [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 le développement des énergies renouvelables en Algérie, ainsi que 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.

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 d'un 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 proposons l'élaboration des modèles mathématiques pour les deux systèmes de production d'énergies, et une modélisation du système de stockage, particulièrement les batteries et les convertisseurs statiques qui ont 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.

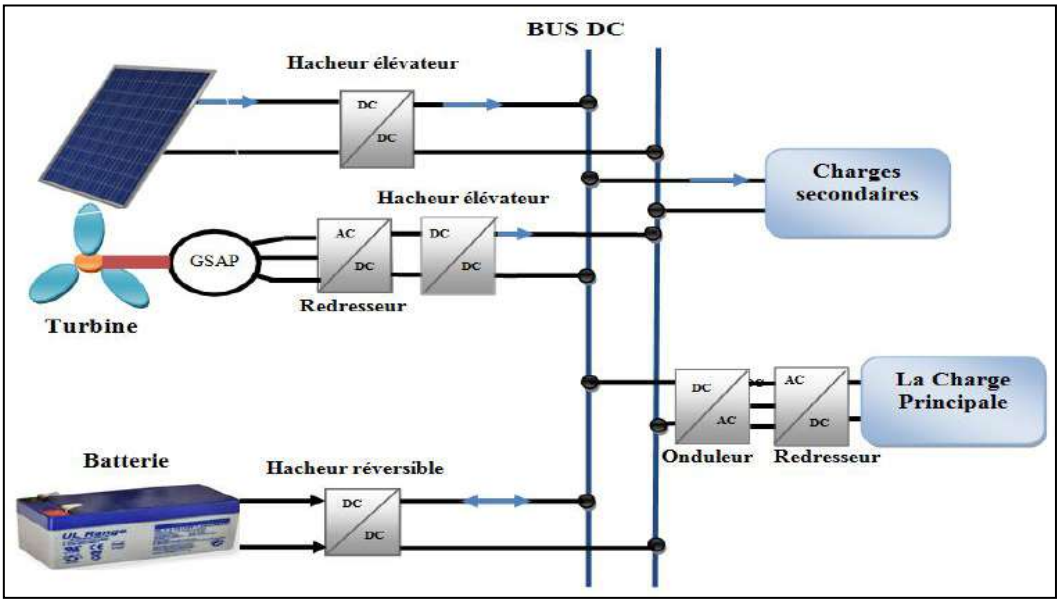



**Figure II.1.** Architecture du système d'énergie hybride étudié.

## 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].

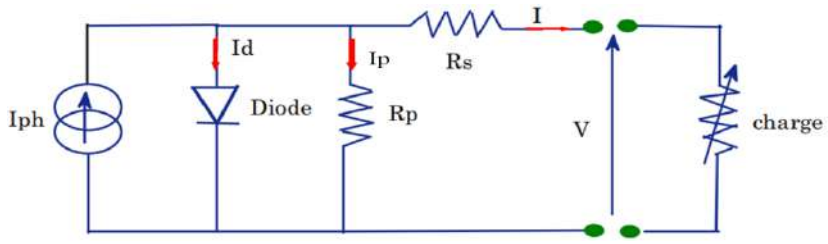



**Figure II.2.** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

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 de la cellule photovoltaïque sous les conditions de l'éclairement G=1000[W/$m^2$] et température T =25 [°c].

Le photo-courant$I_{ph}$, 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 :

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

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

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

$P_{in}$: 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 $W/m^2$et une température de 25°C.

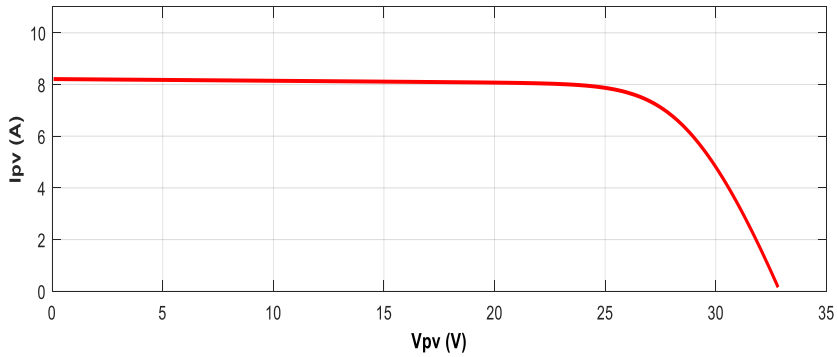



**Figure II.3.** Caractéristique Ipv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque

### 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 $Ppv^{ч}$ a pour expression :

$$P_{pv} = V_{pv} . I_{pv} \quad \textbf{(II-12)}$$

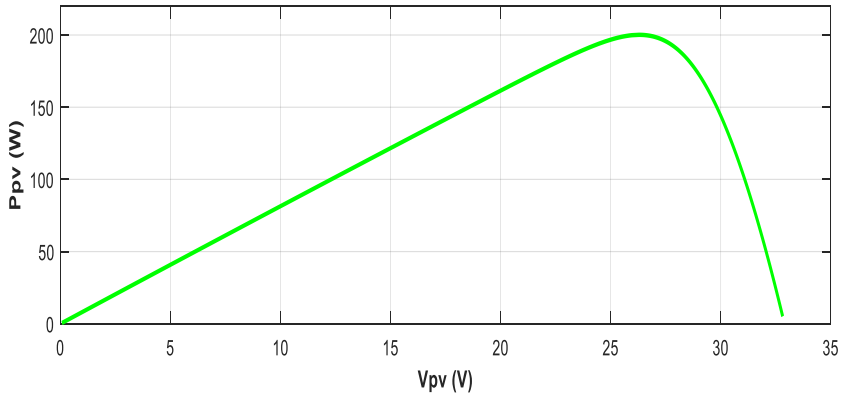



**Figure II.4 .**Courbe Ppv=f(Vpv) d'un module photovoltaïque.

### II.3.3.3.Influence de la température

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

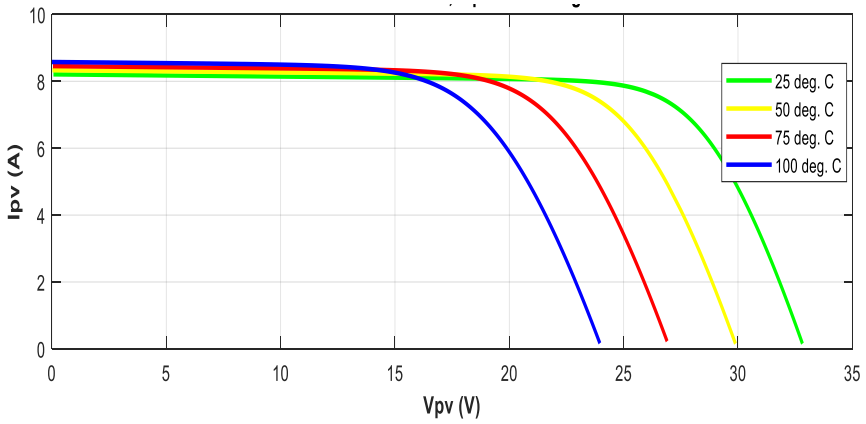



**Figure II.5 .**Influence de la température sur la caractéristique I=f(V).

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.

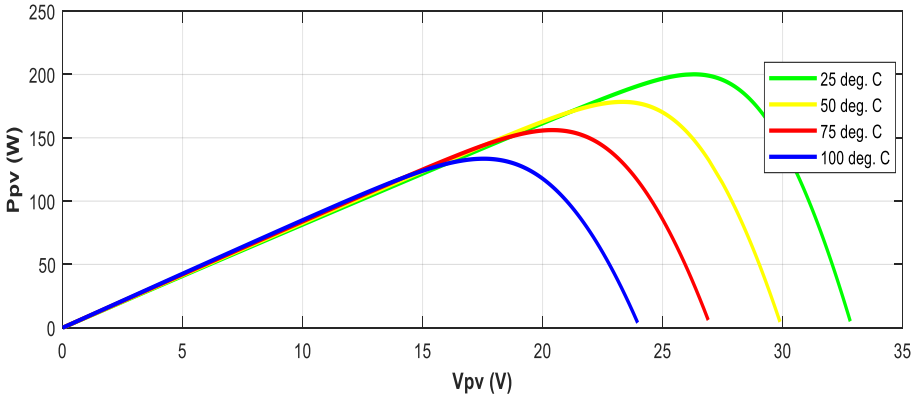



**Figure II.6 .**Influence de la température sur la caractéristique P=f(V).

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

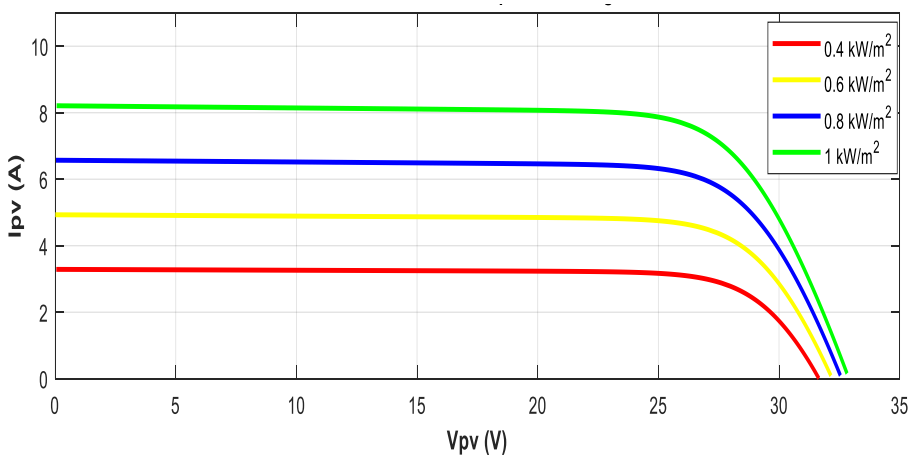



**Figure II.7 .**Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V).

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.

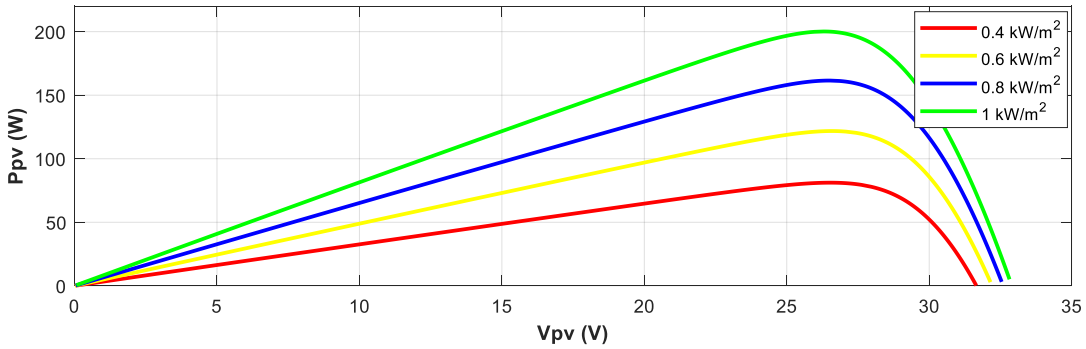



**Figure II.8 .**Influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).

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].

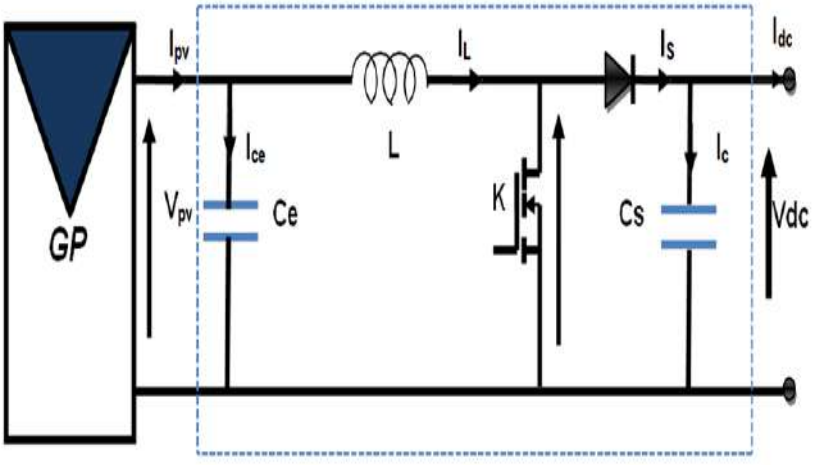



**Figure II.9 .**Schéma de principe d'un convertisseur survolteur

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 l'ensemble turbine et vitesse de vent

- Vitesse de vent

  La vitesse en un point $v_0(t)$ peut être modélisée par une somme d'une composante moyenne V lentement variable et une composante variable représentant les turbulences $v_t(t)$.

$$v_0(t) = V + v_t(t) \quad \textbf{(II-18)}$$

La composante qui représente la turbulence $v_t(t)$ est caracterisee par l'échelle de longueur $L_v$ et de l'écart type $\sigma_v$.La construction mathématique de cette composante se fait en deux étapes.

La première étape consiste a construire un spectre de la turbulence a partir d'un bruit blanc filtré. En effet les filtres les plus utilisés sont le filtre de Von Karman et celui de Kaimal [26].Dans cette thèse on adopte un filtre de Von Karman qui est définit comme suit [35].

$$\emptyset_v(s) = \frac{K_v(m_1 T_v s + 1)}{(1 + T_v s)(1 + m_2 T_v s)} \quad \textbf{(II-19)}$$

Où :

$$K_v = \sqrt{2T_v(1 - m_2^2)\left(\frac{m_1^2}{m_2} - m_2 + m_1^2\right)^{-1}} \quad \textbf{(II-20)}$$

$T_v = {}^{L_v}/_{V}$;

$K_v$=Gain statique;

$T_v$=Constante du gain du filtre ;

$L_v$=L'échelle de longueur des turbulences, il dépend de la nature du terrain;

$m_1$=0,4;

$m_2$=0,25;

Finalement le modèle de la vitesse du vent est obtenu à partir d'un bruit blanc Gaussien, et donné par la Figure II.10.

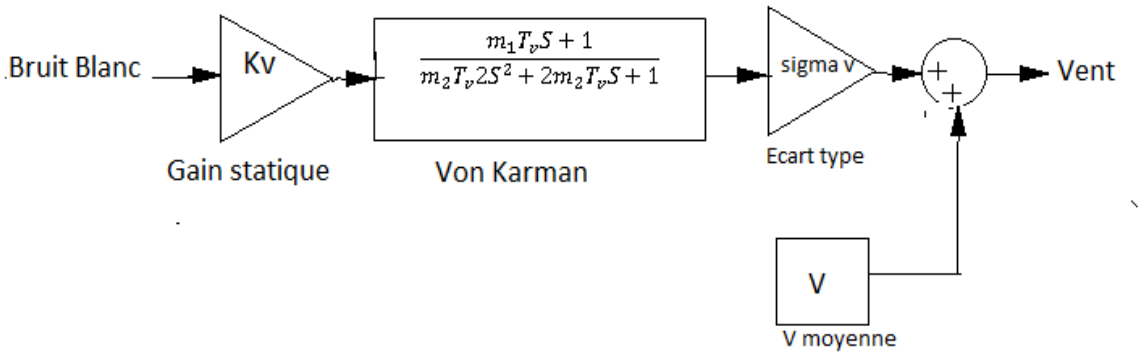



**Figure II.10** .Modèle mathématique de la vitesse du vent.

- 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 :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho . \pi R^2 V^3 \qquad \textbf{(II-21)}$$

Où :

$\rho$ = 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 :

$$P_{\text{Turbine}} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \qquad \textbf{(II-22)}$$

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

$$\lambda = \frac{R\Omega_{\text{Turbine}}}{V} \quad \textbf{(II-23)}$$

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

$$C_{ar} = \frac{P_{Turbine}}{\Omega_T} \quad \textbf{(II-24)}$$

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

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4\right)\exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_1}\right) + C_6\lambda \quad \textbf{(II-24)}$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \textbf{(II-25)}$$

Avec :

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

$\beta$: Angle de calage ; R : longueur de la pale ; $\Omega_T$: vitesse mécanique de la turbine en rad/s.

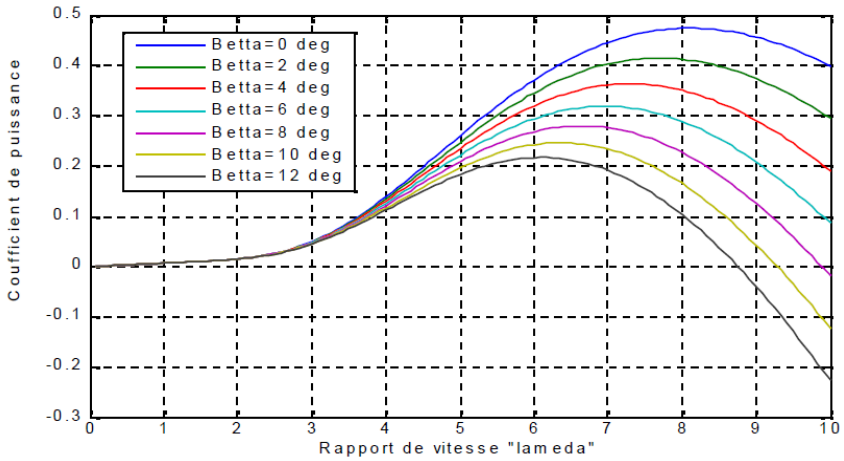



**Figure II.11.**Caractéristique du coefficient Cp (λ,β) pour plusieurs valeurs de β

Sur la Figure (II.11), nous 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.4.2.Modélisation du Multiplicateur :

Le multiplicateur est l'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Il a pour but de régler

la vitesse de la turbine $\Omega_t$ assez lente à la vitesse de la génératrice$\Omega_m$. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain [31] :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{K} \quad \textbf{(II-26)}$$

$$C_{\text{mec}} = \frac{1}{K} C_{\text{aer}} \quad \textbf{(II-27)}$$

Avec :

K : Le gain du multiplicateur.

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

$C_{\text{aer}}$| : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent..

$\Omega_{mec}$ : La vitesse mécanique de la génératrice.

$\Omega_t$ : La vitesse de la turbine.

### II.4.3.Modélisation de l'Arbre Mécanique :

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

$$j\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \quad \textbf{(II-28)}$$

Où :

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

$f$ = coefficient de frottement visqueux.

$C_T$ = (Cem +$C_{\text{mec}}$) = 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.

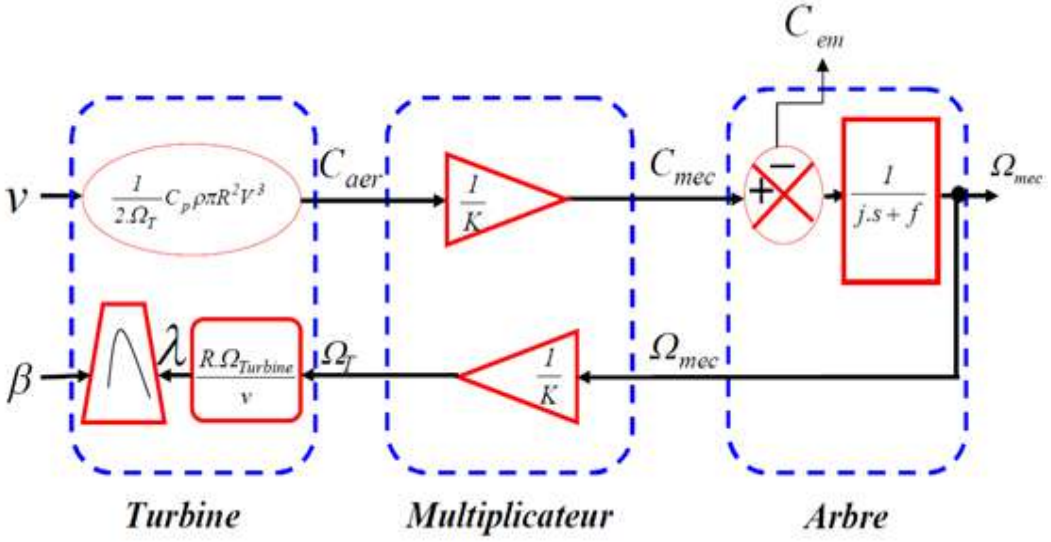



**Figure II.12.** Le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.

### II.4.4.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.4.4.1.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].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [Rs] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-29)}$$

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 totaux $\varphi abc$ sont exprimés par :

$$[\varphi_{abc}] = [L][i_{abc}] + [\Psi_{fabc}] \quad \textbf{(II-30)}$$

Tel que:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_{SS} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-31)}$$

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

En remplacent les relations (I.31) et (I.30) dans, respectivement la relation (I.29), nous obtenons l'expression suivante :

$$[v_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + [L]\frac{d}{dt}[i_{abc}] + [\Psi_{abc}] \quad \textbf{(II-32)}$$

### II.4.4.2.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] .

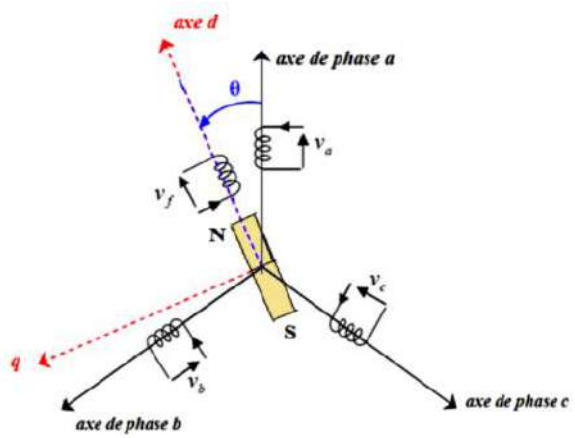



**Figure II.13 .**Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

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)].

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)][X_{abc}] \quad \textbf{(II-33)}$$

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 :

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

Dont la matrice inverse [p(θ) −1] :

$$[p(\theta)^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{2}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II-35)}$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_q \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_d \end{cases} \quad \textbf{(II-36)}$$

Avec:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_d i_{ds} + \Psi_f \\ \varphi_{qs} = L_q i_{qs} \\ \omega_r = p\Omega_m \end{cases} \quad \textbf{(II-37)}$$

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 :

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

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

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + p\Omega_m L_q i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - p\Omega_m L_d i_{ds} + p\Omega_m \Psi_f \end{cases} \quad \textbf{(II-39)}$$

### II.4.4.3.Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par:

$$c_{em} = \frac{3}{2} p(-\varphi_{ds} i_{qs} + \varphi_{qs} i_{ds}) \quad \textbf{(II-40)}$$

En remplaçant les flux par leurs expressions, on aura:

$$c_{em} = \frac{3}{2} p[(L_q - L_d) i_{ds} i_{qs} + \Psi_f i_{qs}] \quad \textbf{(II.41)}$$

### II.4.4.4.Equations mécaniques :

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

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = c_m - c_{em} - f_m * \Omega_m \quad \textbf{(II.42)}$$

Avec :

$c_m$ :Le Couple moteur appliqué sur la génératrice.

### II.4.5.Modélisation du redresseur PD3 à diodes

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

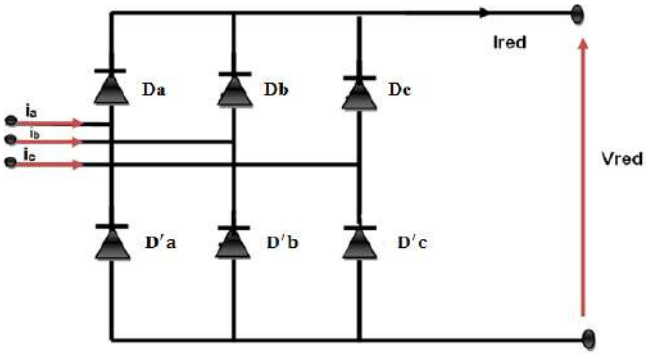



**Figure II.14.** Schéma du redresseur PD3 à diodes

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 :

$$V_a(t) = V_{max} \sin(wt)$$
$$V_b(t) = V_{max} \sin\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \textbf{(II.43)}$$
$$V_c(t) = V_{max} \sin\left(wt - \frac{4\pi}{3}\right)$$

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.

$$V_a = \text{Max}\,(V_j); j = a, b, c \quad \textbf{(II.44)}$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{conduit si} V_i = \text{Max}\,(V_j); j = a, b, c; i = a, b, c \quad \textbf{(II.45)}$$
$$D_i^{'} \text{conduit si}\ V_i = \text{Min}\,(V_j); j = a, b, c; i = a, b, c$$

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

$$U_{red}(t) = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j); j = a, b, c \quad \textbf{(II.46)}$$

Sa valeur moyenne est donnée par :

$$(U_{red})_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{\text{max}} \quad \textbf{(II.47)}$$

## 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].

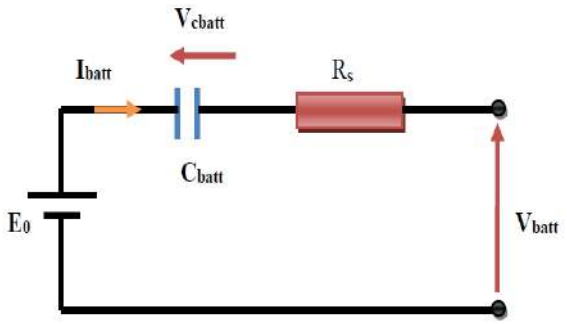



**Figure II.15.** Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R_{s^*} I_{\text{batt}} - V_{\text{cbatt}} \quad \textbf{(II.48)}$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{\text{batt}}} \quad \textbf{(II.49)}$$

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 :

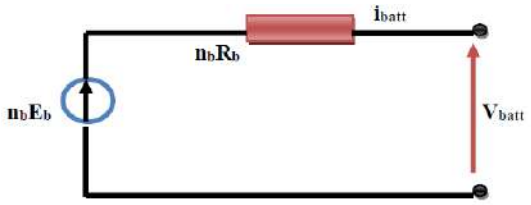



**Figure II.16.** Modèle CIEMAT de la batterie.

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

$$ED\frac{c_{\text{batt}}}{c_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67.(\frac{I_{\text{batt}}}{I_{10}})^{0.9}} \cdot (1 + 0.005.\Delta T) \quad \textbf{(II.50)}$$

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{batt} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_b \cdot I_{batt} \quad \textbf{(II.51)}$$

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

- La tension en décharge :

$$V_{\text{batt-dech}} = n_b \cdot [1.965 + 0.12.EDC] - n_b.\frac{|i_{\text{batt}}|}{c_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1+|i_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{(1-EDC)^{1.5}} + 0.02\right) \cdot (1 - 0.007.\Delta T) \quad \textbf{(II.52)}$$

- La tension en charge :

$$V_{\text{batt-char}} = n_b.[2 + 0.16.EDC] + n_b.\frac{|i_{\text{batt}}|}{c_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1+|i_{\text{batt}}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036\right) \cdot (1 - 0.025.\Delta T) \quad \textbf{(II.53)}$$

### 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].

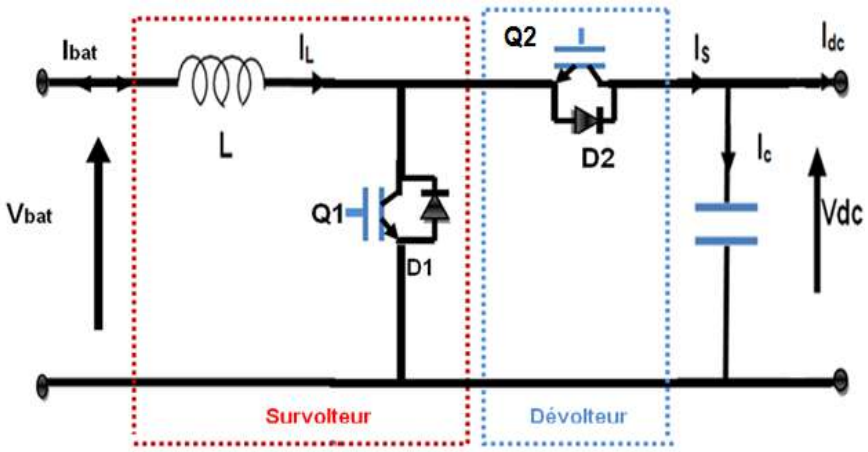



**Figure II.17.** Hacheur réversible en courant

À noter que la commande des interrupteurs Q1et Q2 est réalisée simultanément avec deux signaux (rapports cycliques) complémentaires D et 1− D. Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équations (II.53) [37].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L}[v_{bat} - D\ v_{dc}] \\ \frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}[D\ I_L - I_{dc}] \end{cases} \quad \textbf{(II.54)}$$

## 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) [27].

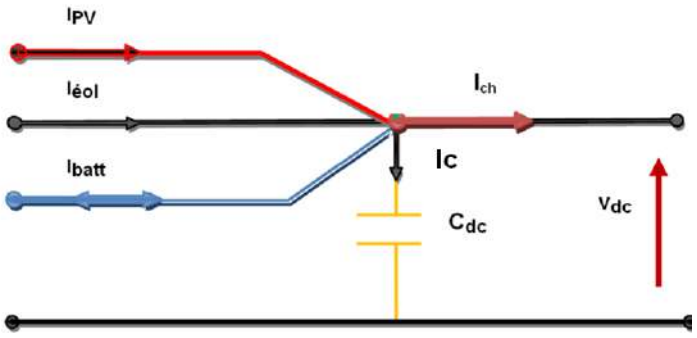



**Figure II.18.** Modèle du bus continu.

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_c = C\frac{dV_{dc}}{dt} \quad \textbf{(II.55)}$$

$$I_c = I_{pv} + I_{eol} \pm I_{batt} - I_{ch} \quad \textbf{(II.56)}$$

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[27].

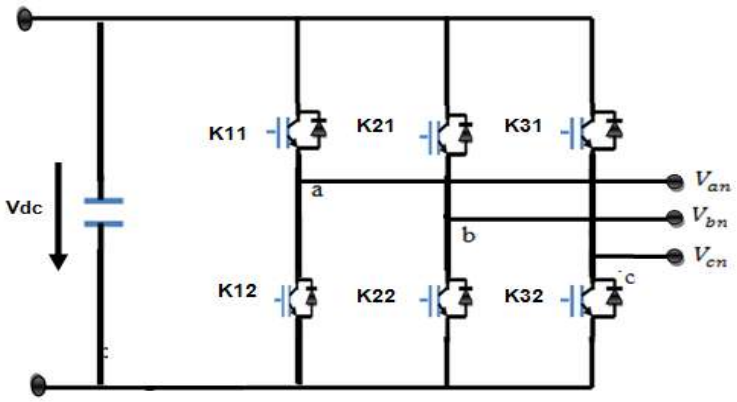



**Figure II.19.** Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

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 :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{\text{co}}) \end{cases} \quad \textbf{(II.57)}$$

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 en tenant compte du point fictif "**o**" représenté par :

$$V_{io} = V_{dc}(S_i - \frac{1}{2}) \quad \textbf{II.58)}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{an} \end{bmatrix} = \frac{V_{ds}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \textbf{II.59)}$$

## 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

Après avoir établi précédemment les modèles mathématiques du système multi-source : PV, éolien, batterie, plus les convertisseurs statiques. Ce chapitre, sera consacré a la synthèse des commandes nécessaires et présenter les résultats obtenus après la simulation de chaque composant de ce système hybride autonome.

Il 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.

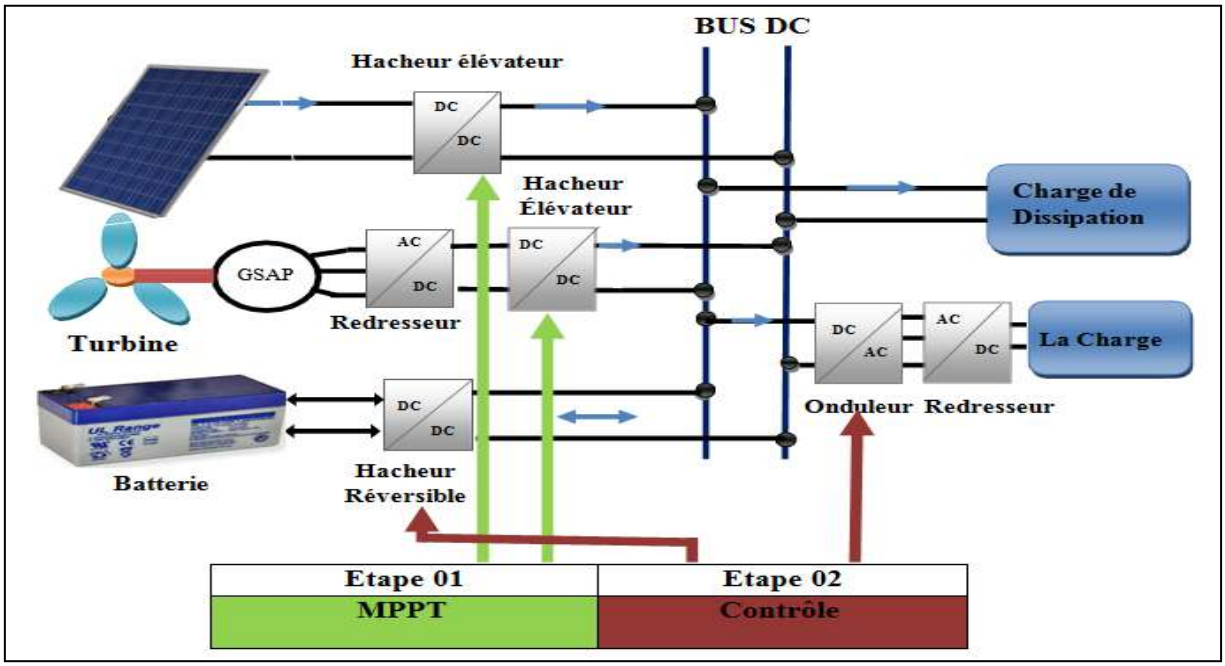



**Figure.III.1.**Schéma du SEH global

## III.2. Description des algorithmes MPPT

Pour maximiser la production des sources d'ER (PV et éolien), un algorithme de suivi du point de puissance maximale, couramment nommé MPPT est appliqué.

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 [35].

### 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 d'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 [34].

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.

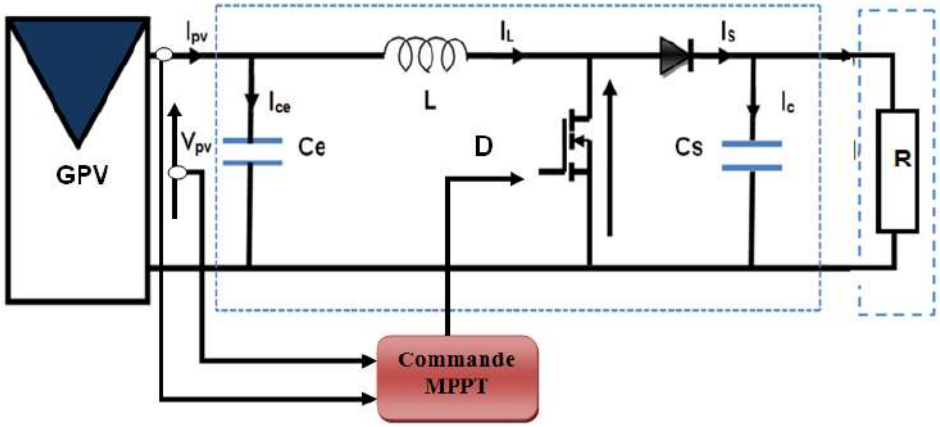



**Figure III.2.** Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT

Il existe dans littérature 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. Dans le présent travail pour optimiser l'énergie du système PV, deux algorithmes MPPT sont développés et exploités, à savoir : Perturbation et Observation, et Logique Floue [38][34].

#### 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 [19] ; 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 $P$pv, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système à dépassé le PPM [39].

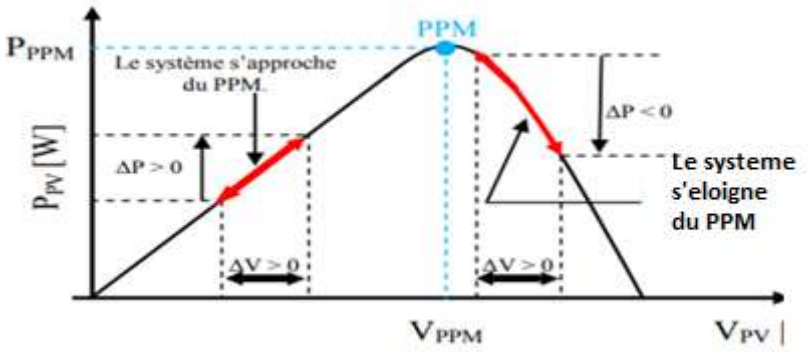



**Figure.III.3.** Principe de la MPPT avec la méthode P&O.

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 [19].

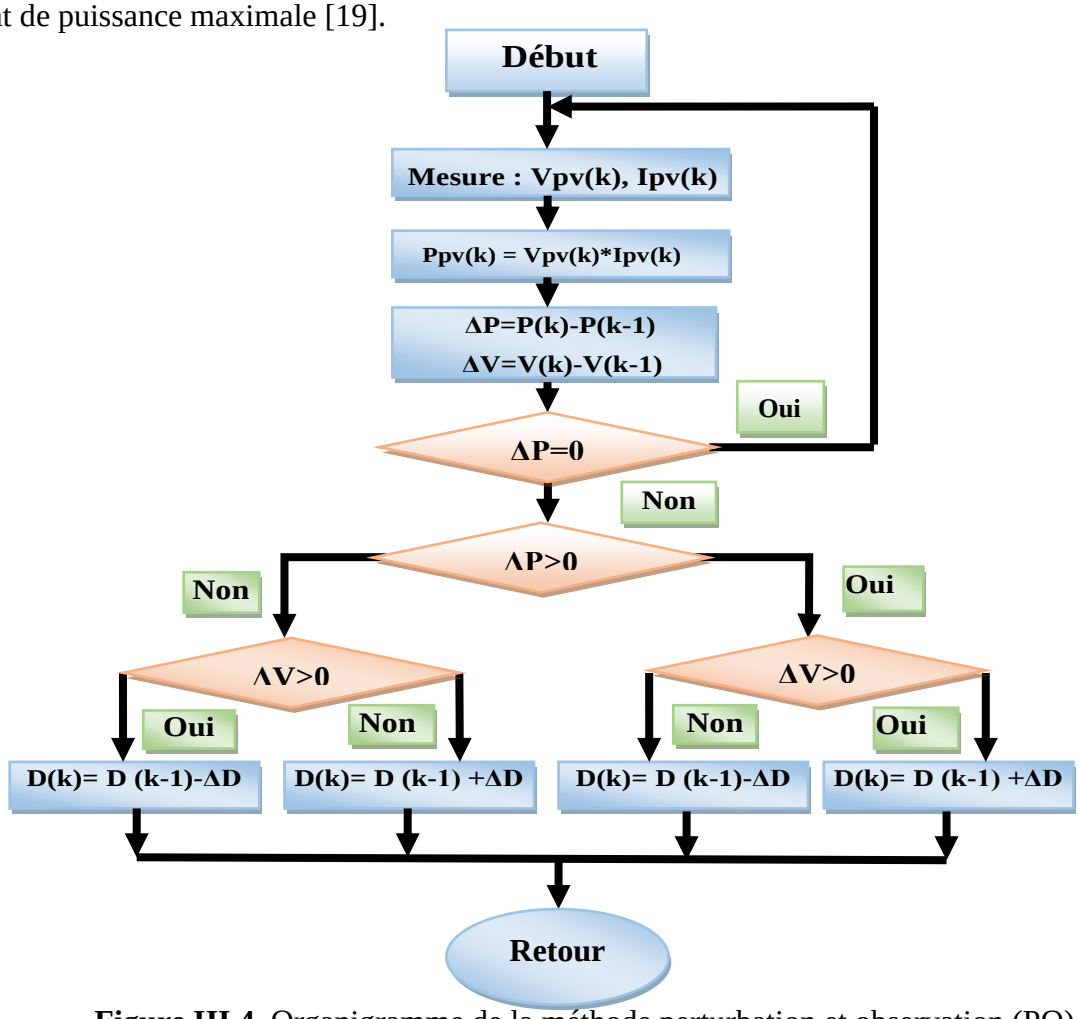



**Figure.III.4.** Organigramme de la méthode perturbation et observation (PO).

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].

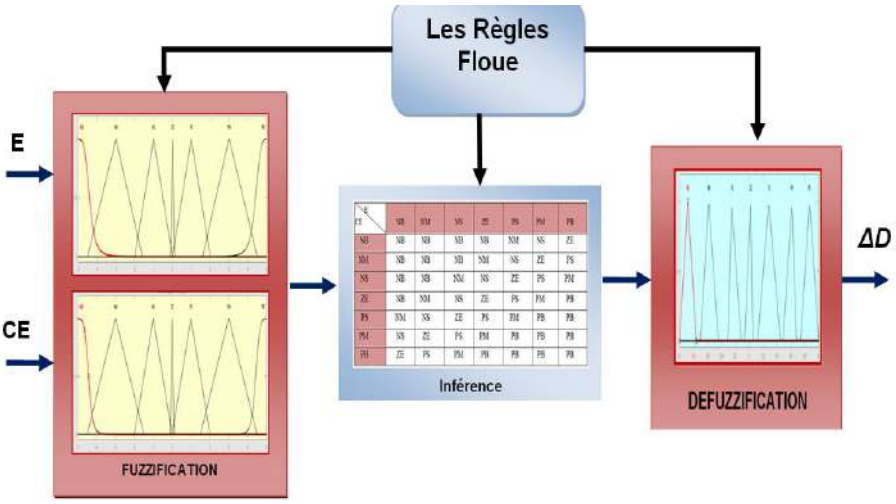



**Figure III.5.** Structure de base du contrôleur flou MPPT.

#### 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, la sortie de la logique floue est la variation 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.

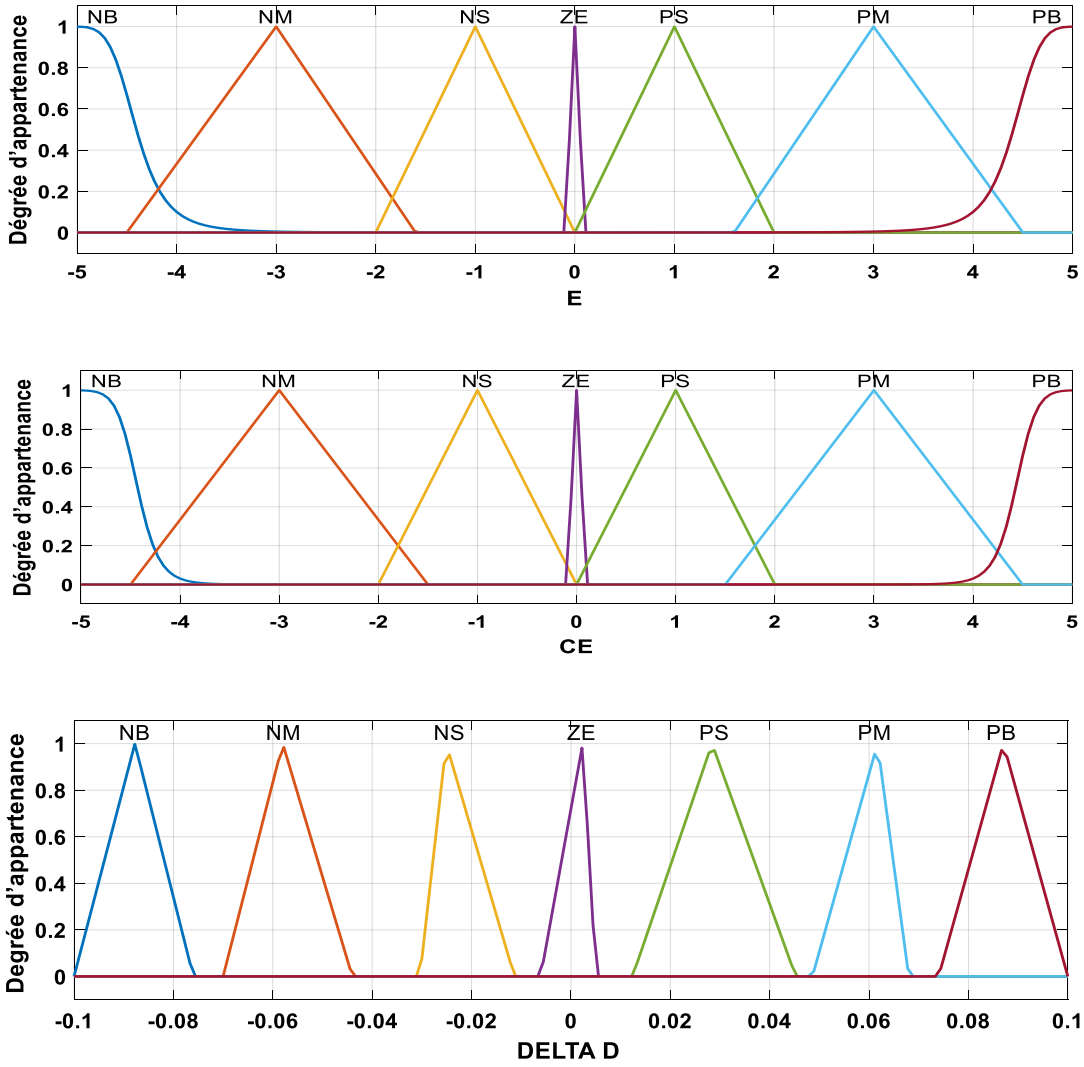



**Figure III.6.** Fonctions d'appartenance des entrées : E, CE et de la sortie ΔD.

### 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' [10] [38].

| E \ CE | 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

la défuzzification est l'étape qui consiste a passer du «domaine flou» vers le «domaine réel». Elle 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 [10]:

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

### III.2.1.3.Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque

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.

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. Les paramètres utilisés sont résumés dans l'annexe.

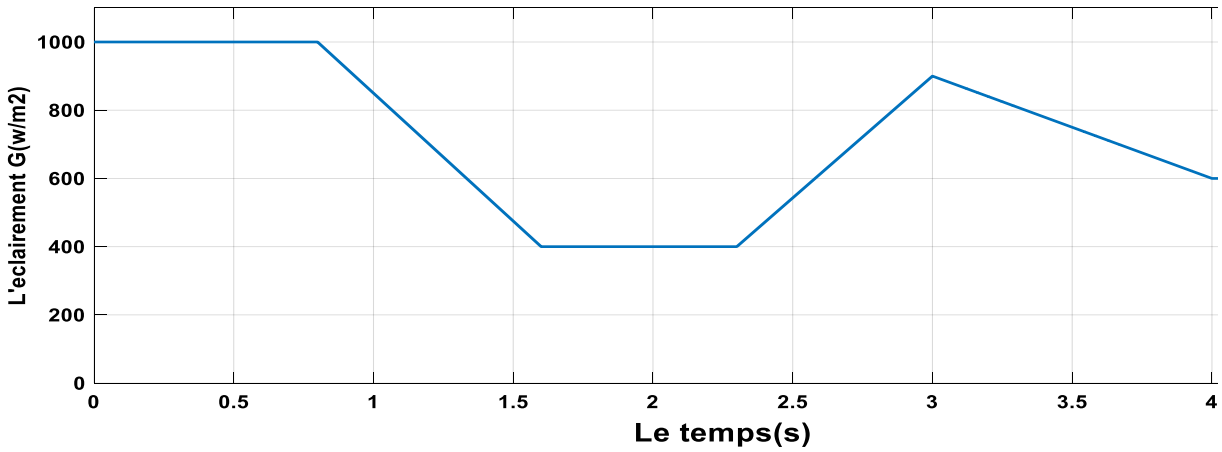



**Figure.III.8. Profil de l'éclairement**

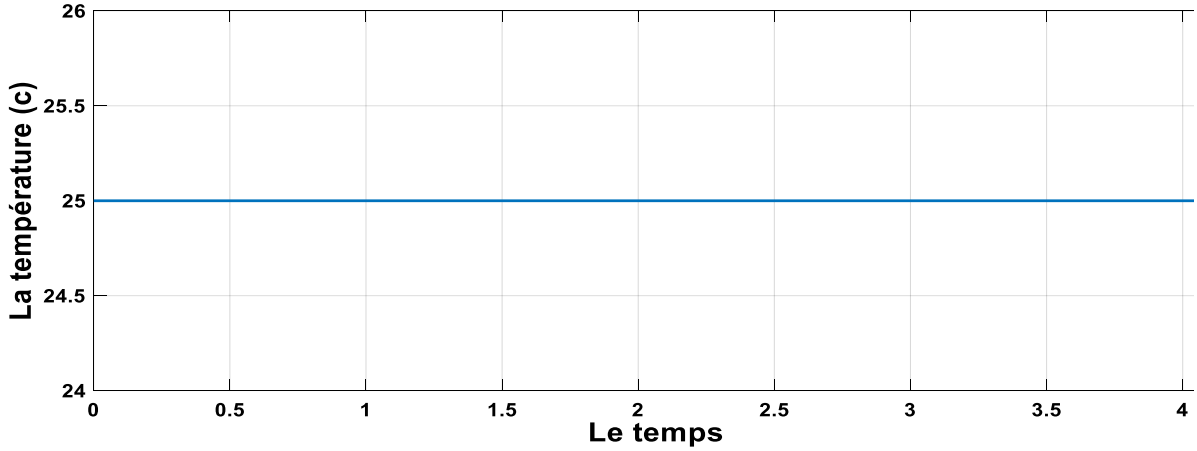
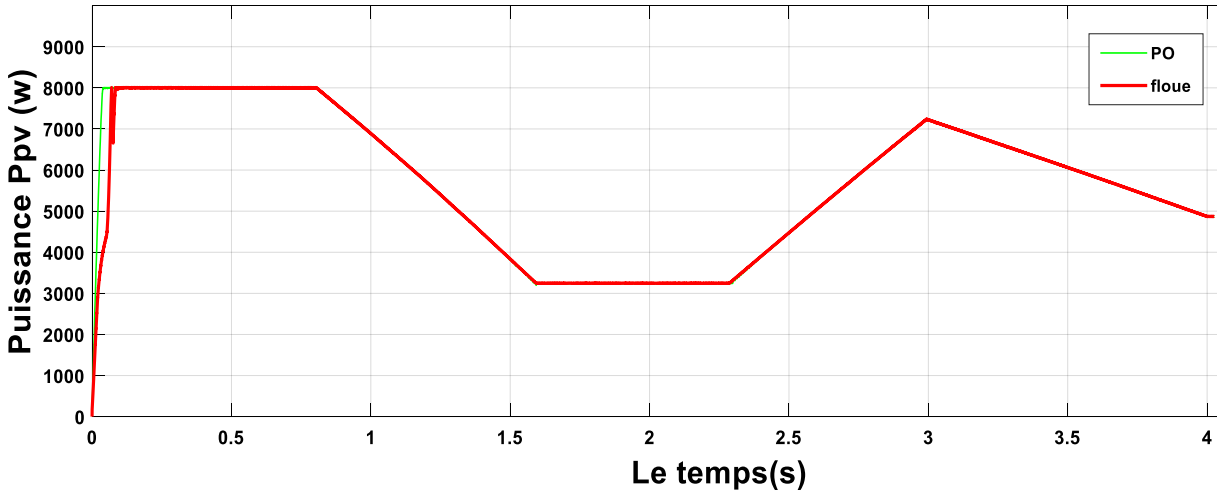
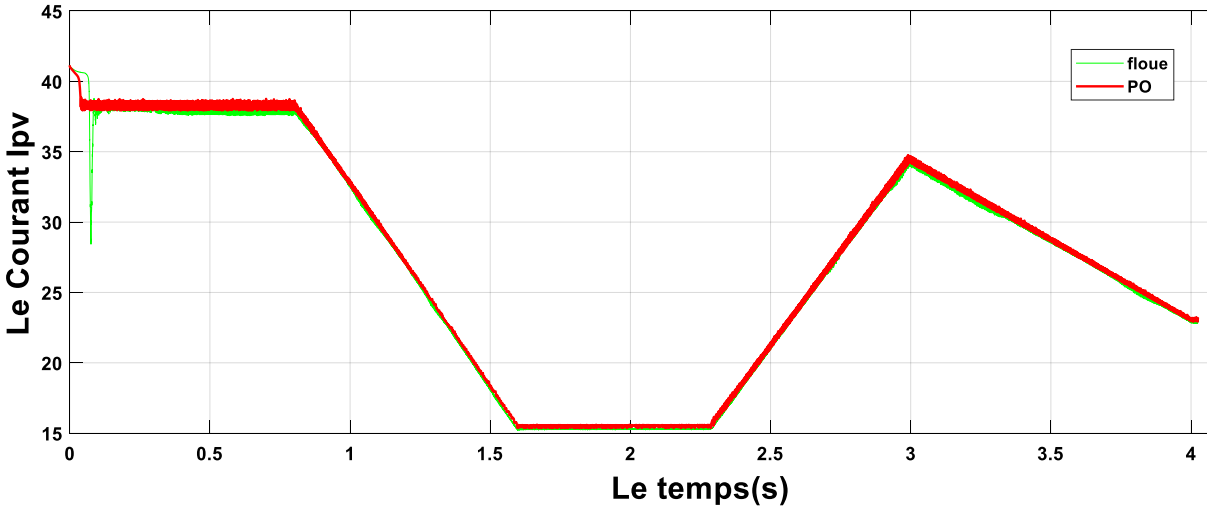



**Figure III.9.** Profil de la température

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

Les résultats simulation montrent 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, on constate que l'algorithme P&O présente des oscillations autour de la valeur optimale, cette oscillation autour du MPP peut être minimisée en réduisant la taille du pas de perturbation D. Cependant, les performances dynamiques sont gênées par une plus petite taille de pas de perturbation. L'autre technique : la logique floue offre 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 :

La commande MPPT destinée pour une éolienne de petite puissance, doit respecter les contraintes de simplicité et du coût sans altérer l'efficacité [43] [44].On peut distinguer entre deux grandes catégories de stratégies MPPT : des stratégies nécessitant la connaissance préalable de la caractéristique$Cp\ (\lambda)$ de l'éolienne, et des stratégies ne nécessitant pas la connaissance de cette courbe caractéristique [11].

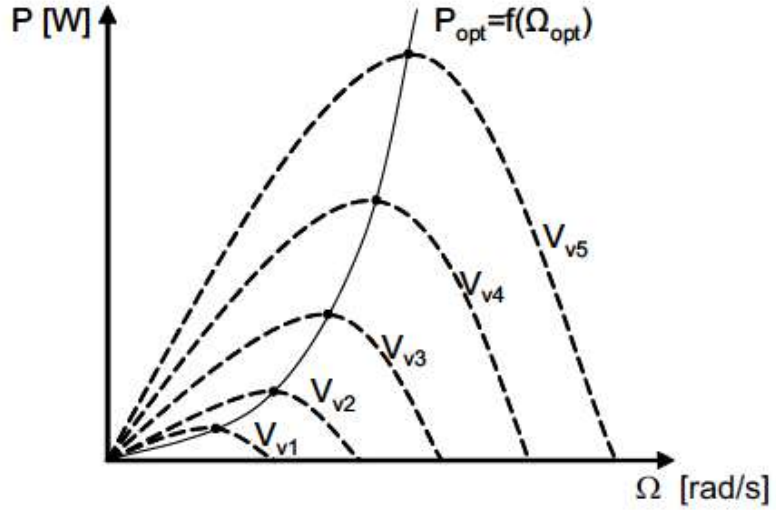



**Figure.III.11.**Caractéristiques de voilure dans le plan puissance-vitesse.

- **MPPT sans connaissance de la courbe caractéristique $C$p ($\lambda$) de la turbine :**

Comme son nom l'indique, dans cette catégorie, nous considérons que la caractéristique $Cp$ ($\lambda$) 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 processus de conversion de l'énergie éolienne est plus compliqué à cause de la nature stochastique 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 ; où l'on détermine la vitesse optimale selon chaque vitesse de vent pour commander le rotor a suivre cette vitesse. De plus, il y a la commande en couple, qui consiste a calculer le couple optimal pour chaque vitesse de vent [25].

Nous allons supposer 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.

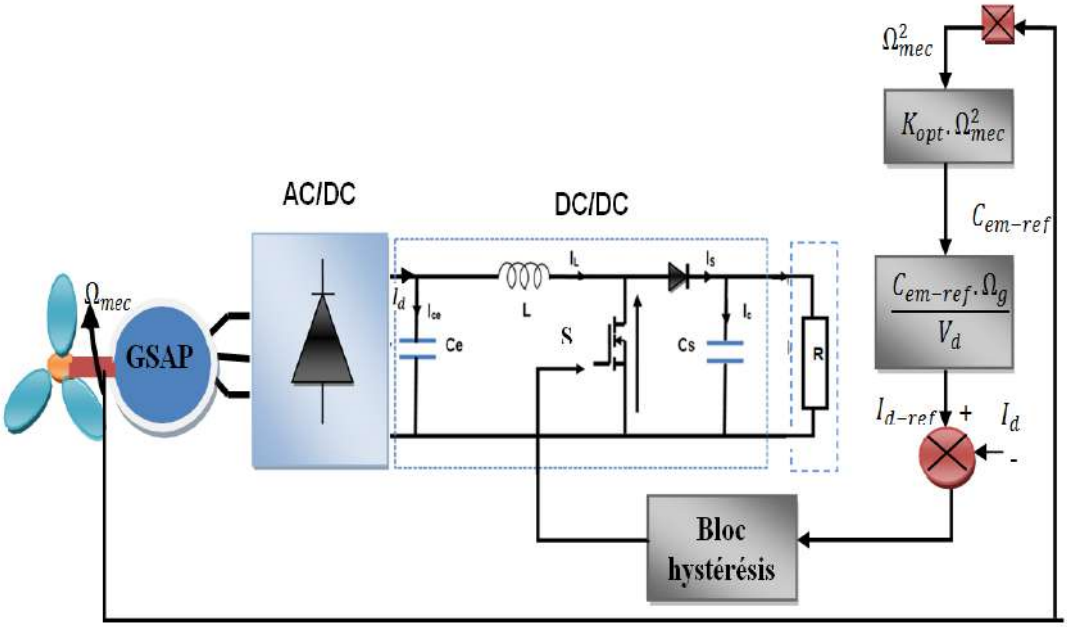



**Figure.III.12.** Structure de contrôle d'une turbine éolienne.

Cette structure de contrôle repose sur l'hypothèse qu'en régime permanent, nous pouvons négliger la variation de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine [10]. En conséquence, le couple mécanique exercé sur l'arbre est nul.

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

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 :

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

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 III.12. 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] [27] :

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

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 [26].

### 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.

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.13.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.
Les paramètres utilisés sont résumés dans l'annexe.

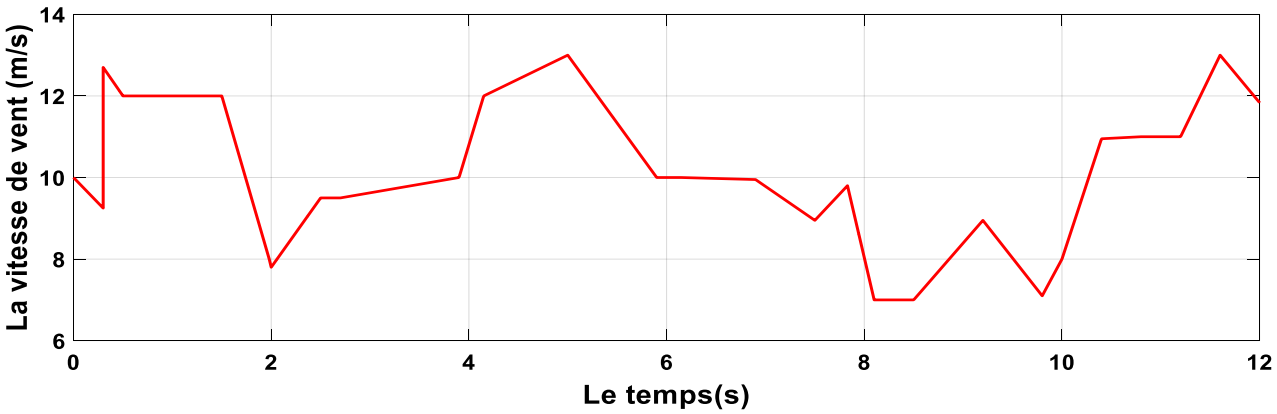



**Figure III.13.**Vitesse du vent.

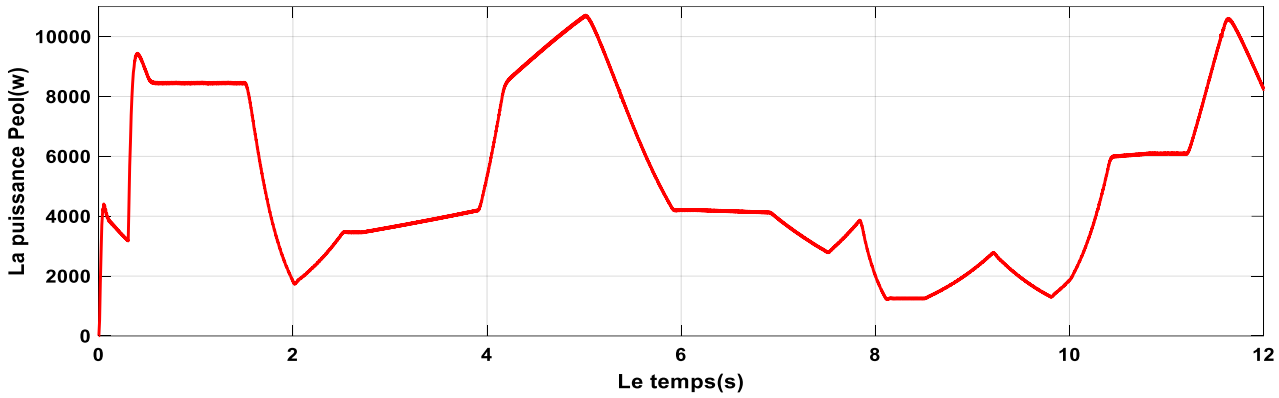



**Figure III.14.**la puissance éolienne.

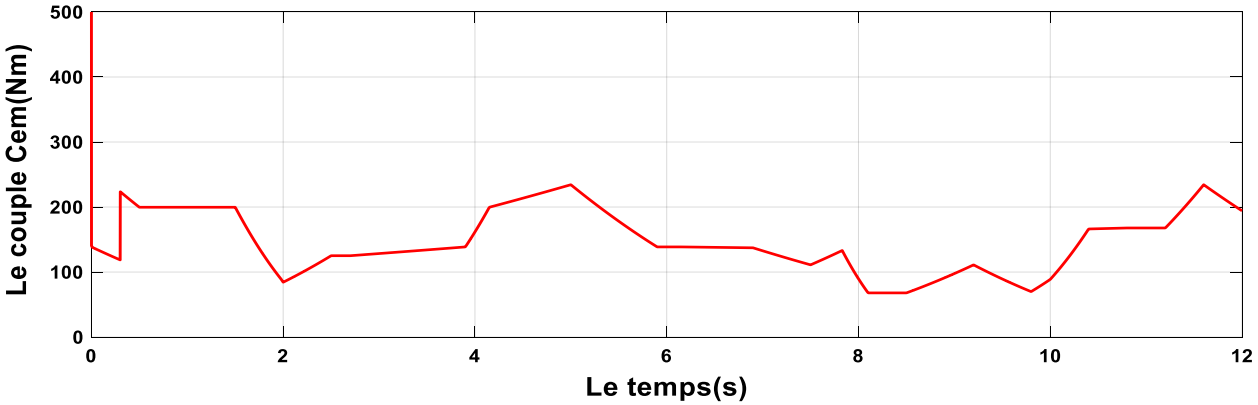



**Figure III.15.** le couple electromagnetique.

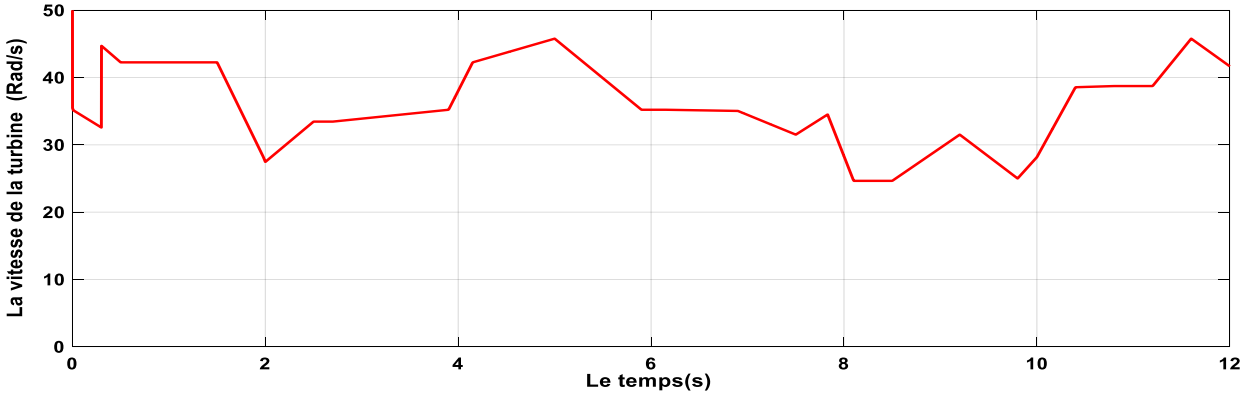



**Figure III.16.**la vitesse de la turbine.

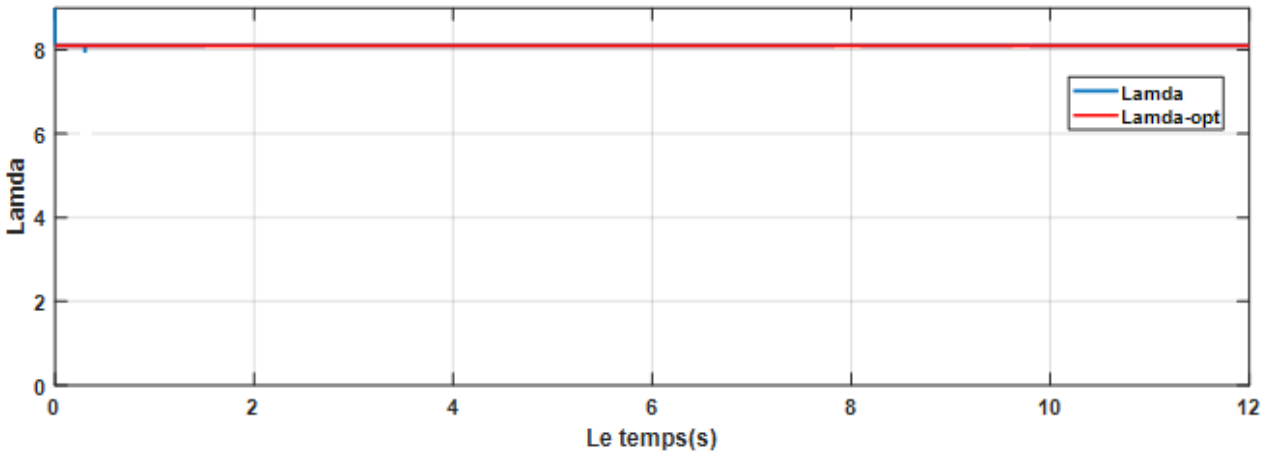



**Figure III.17.**Vitesse spécifique

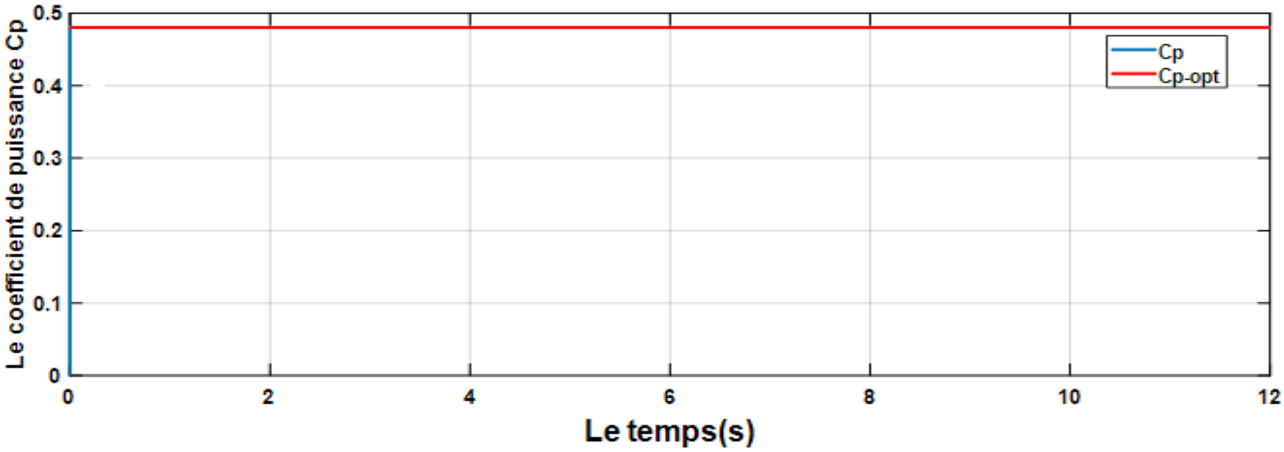



**Figure III.18.**Coefficient de puissance.

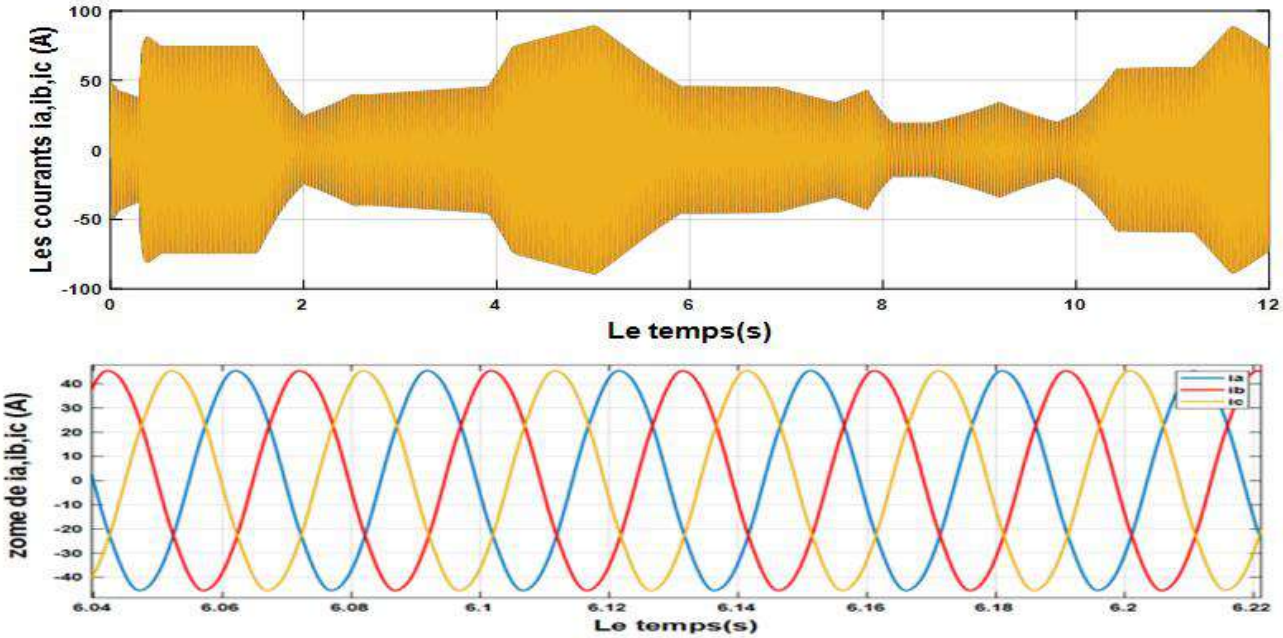



**Figure III.19.**Courant : ia, ib et ic de la MSAP.

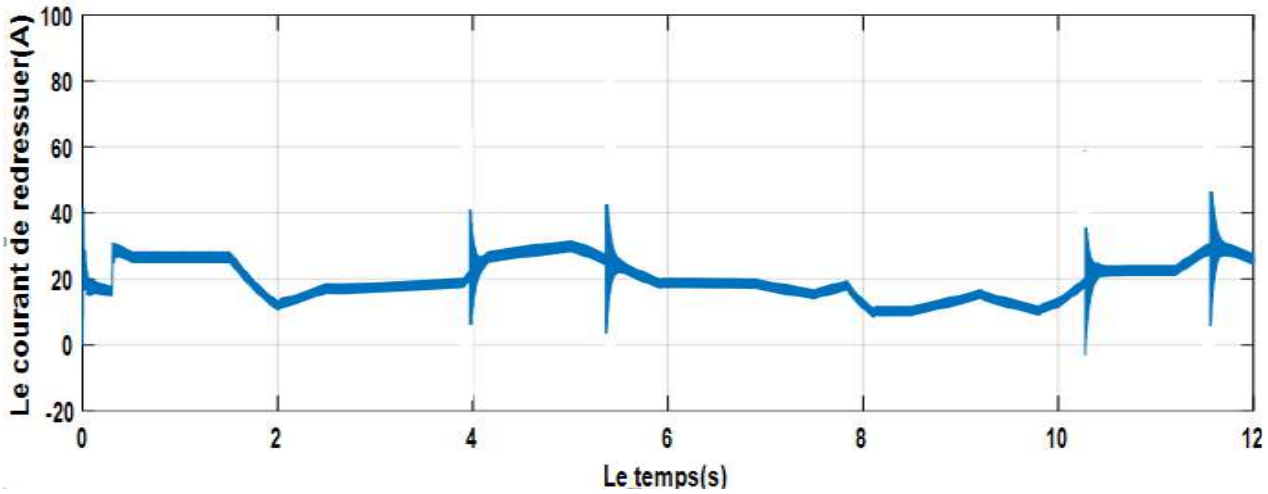



**Figure III.20.**Courant de sortie du redresseur.

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 [27] :

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

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

Dans le 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 [14]-[49]. La régulation de la tension du bus continu est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant.

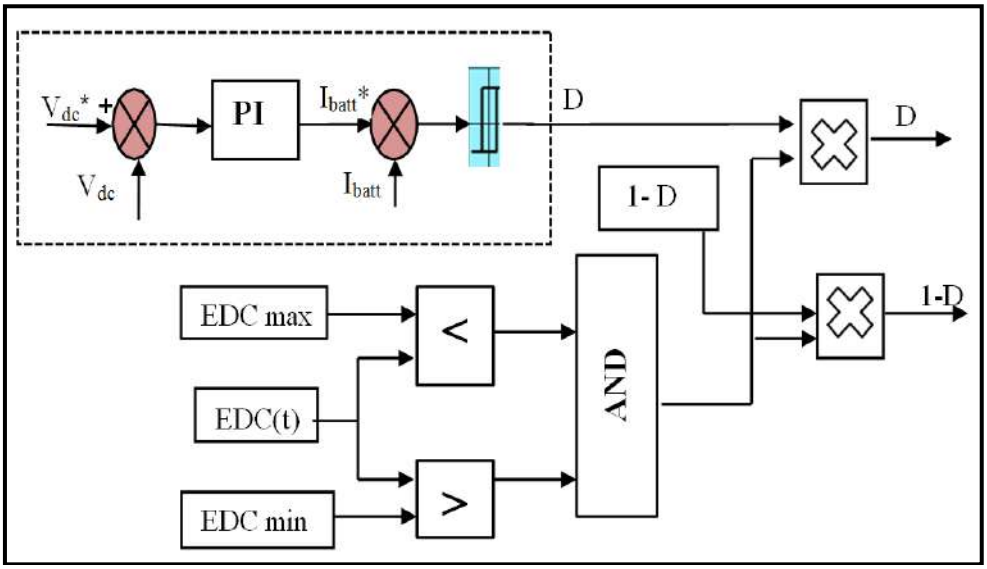



**Figure III.21.**Schéma de commande de la tension du bus continu

La figure (III.21) 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]- [50]-[53].

- 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.

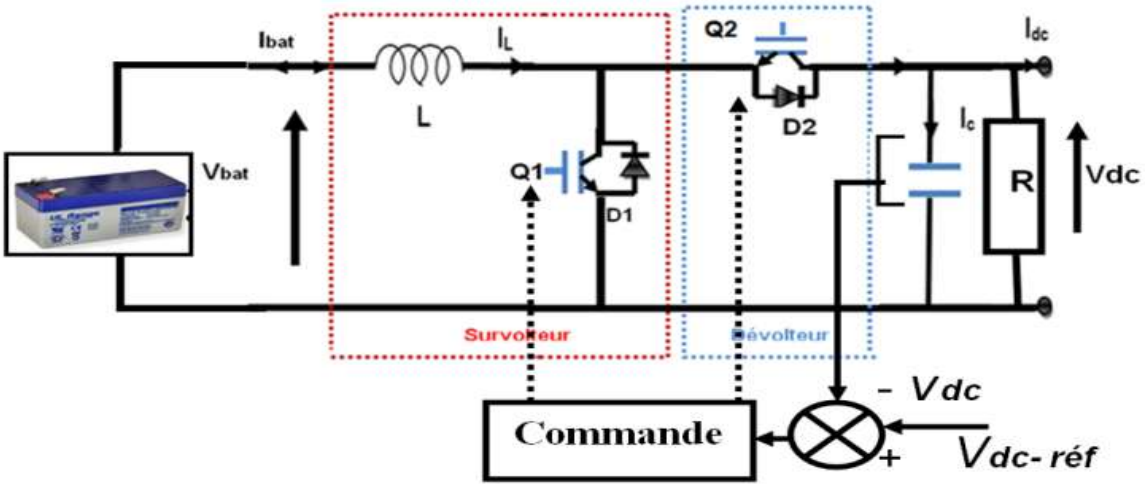



**Figure III.22.**Structure de contrôle du hacheur réversible en courant

### 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 [27].

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.

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

### III.3.1.2.Simulation du bus continu

Afin de tester l'efficacité de la commande utilisée pour contrôler la tension du bus continu, nous allons effectuer un test de robustesse. Pour cela, 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.23.

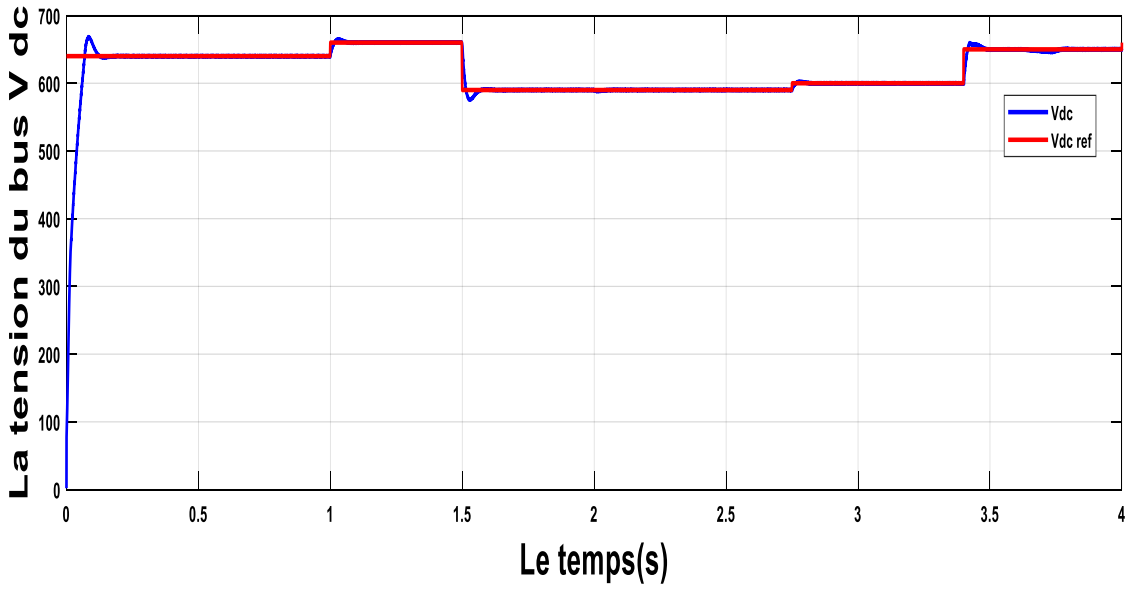



**Figure III.23.**Régulation du bus continue

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

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

La technique de modulation a largeur d'impulsion (MLI) pour l'obtention des signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur ( figure III.24), 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.

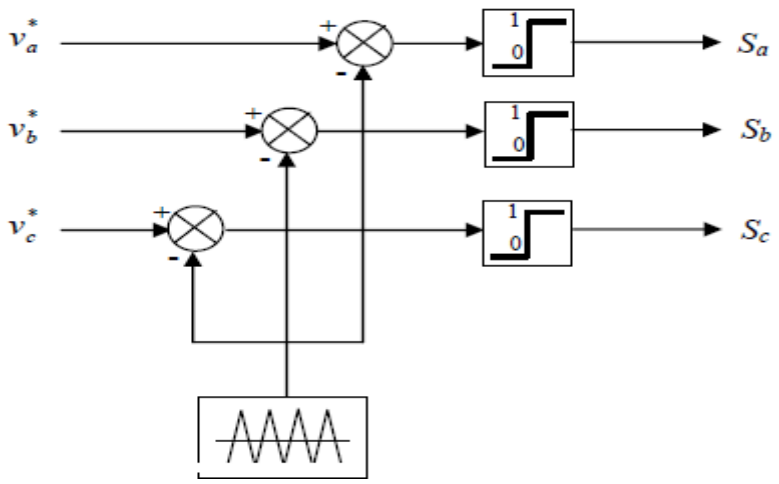



**Figure.III.24.** Principe de la modulation de la largeur d'impulsion M.L.I.

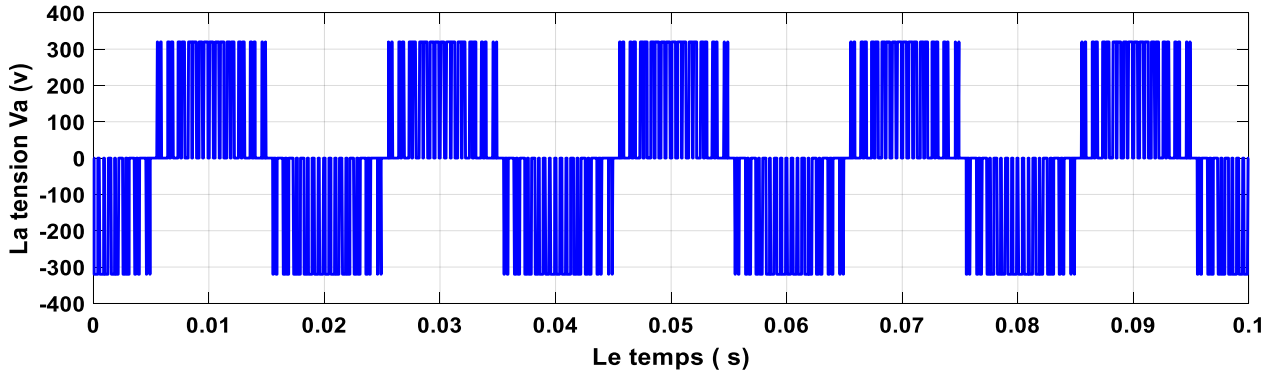



**Figure III.25**.Tension Va de l'onduleur

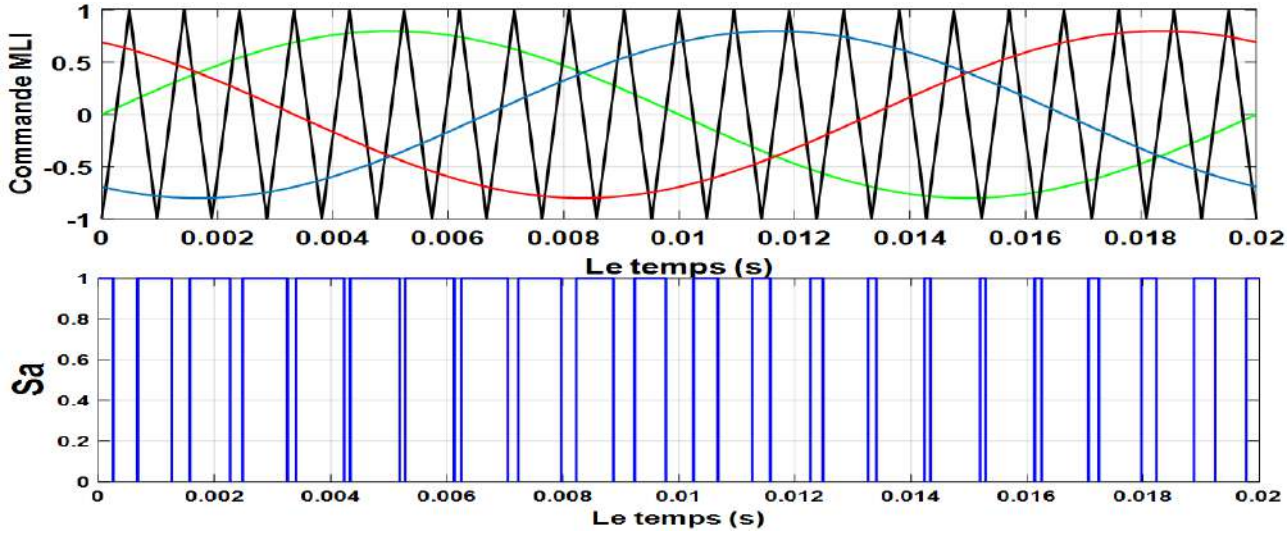



**Figure III.26.**Principe de la commande MLI.

Les figures III.25 et III.26 montrent respectivement le comportement d'une MLI réalisée avec la technique "triangulo_Sinusoïdale " et la tension Va de l'onduleur.

## III.5. 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 les 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 avons supposer que les caractéristiques de la turbine sont connues, et nous avons adapter 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, que la commande de l'onduleur connecté au bus continu. Afin de tester l'efficacité des différentes commandes appliquées pour les sous-systèmes distincts du SEH, nous avons considérés 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.

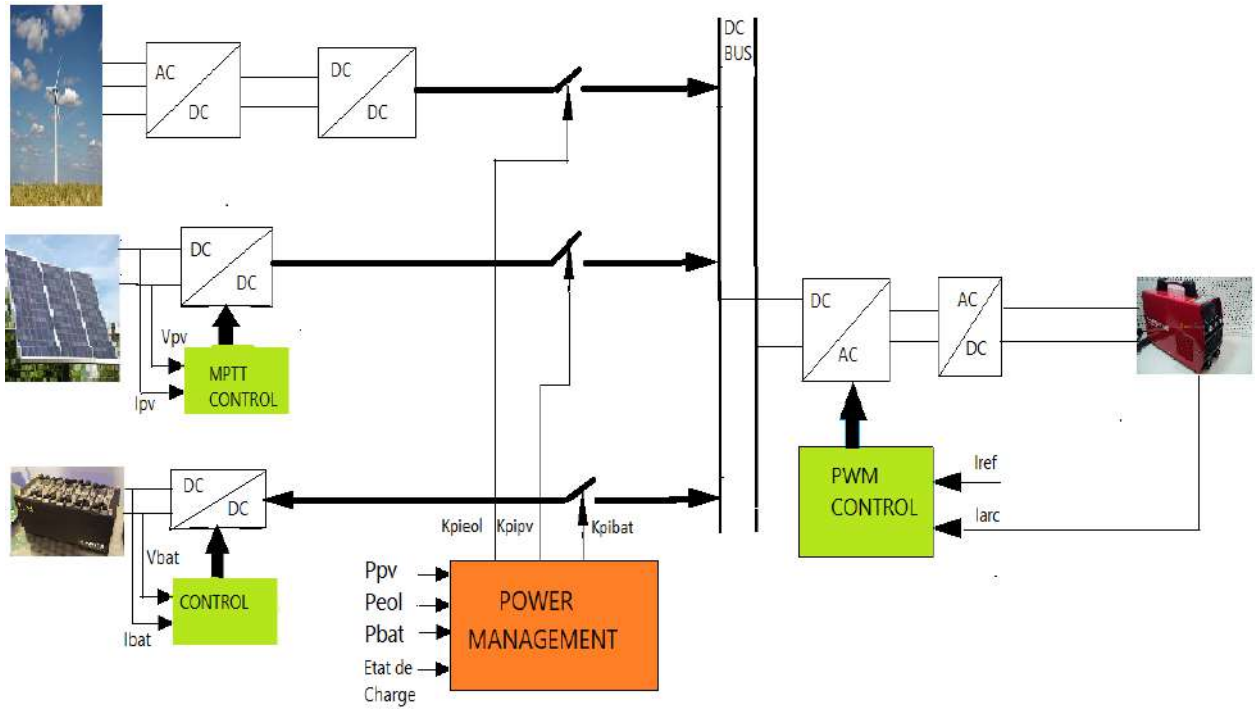
# IV.Chapitre 4 : Gestion et simulation du SEH appliquée au poste à soudé onduleur

## IV.1. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre 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 global du système.

## 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 allons envisagés tout les scenarios possibles qui peuvent interagirent et influencer le processus de fonctionnement, en se basant sur la nature des paramètres aléatoires qui sont les conditions climatiques propres a la régions choisie Adrar[62] dans le sud algérien.

Ainsi, 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 ,dans la même contexte une journée en hiver peut être très venteuse et nuageuse etc. …, selon les sources d'énergie disponible, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie.

Le tableau (IV.1) exprime l'état de chaque composant constituant le SEH, qui doit pondérer la stratégie de gestion qui servira de base pour l'élaboration des algorithmes qui sera adoptes dans ce travail.

| Etat | | Actif | Inactif |
|---|---|---|---|
| sources principales | PV | • Pendant un jour ensoleillé. | • Pendant la nuit ;<br>• Pendant un jour nuageux ;<br>• En cas de panne. |
| | Eolien | • Pendant la nuit.<br>• Pendant un jour nuageux. | • En cas de Vitesse du vent < à la Vitesse de démarrage de l'éolien.<br>• En cas de panne.<br>• 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:<br>1. Les conditions climatiques sont faibles ;<br>2. La demande de la charge est supérieure à la production ;<br>3. En cas de panne d'une source ou les deux sources principales ;<br>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 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 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.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 les tableaux (IV.4,5).

- **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 comme source principale.

**Figure IV.3** Organigramme de gestion qui considère le système de conversion photovoltaïque comme source principale.

| 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 |

**Tableau IV.2** Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion ( éolien comme source principale).

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 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.3** Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion (PV comme source principale).

- **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.4.**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 suffisante 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.

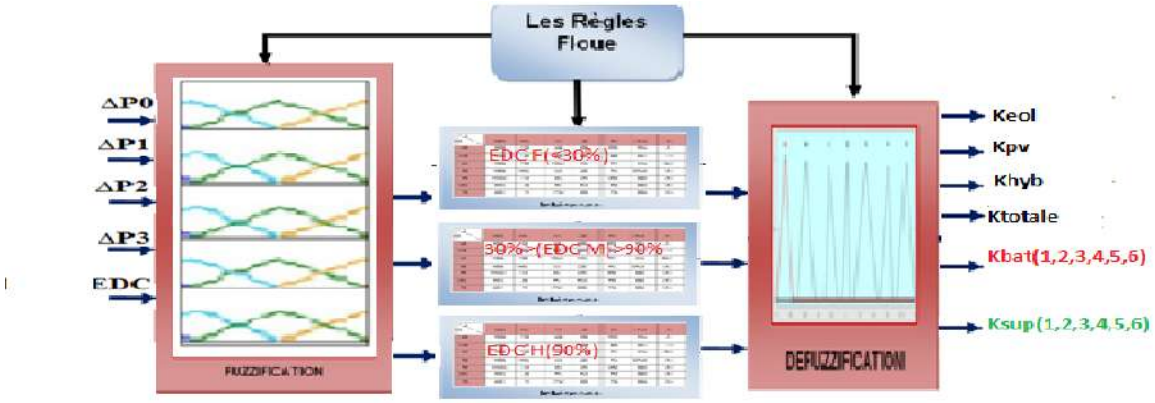



**Figure IV.4.** Système de supervision à base de la logique floue.

#### 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 alimentant la charge par la puissance Ppv seulement;
- **Keol:** interrupteur alimentant la charge par la puissance Peol seulement;
- **Khybr :** interrupteur alimentant la charge par la puissance Phybr ;
- **Kptotale :** interrupteur alimentant la charge par la 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 alimentant la charge supplémentaire par la puissance Ppv ;
- **Ksup2 :** interrupteur alimentant la charge supplémentaire par la puissance Peol ;
- **Ksup3 :** interrupteur alimentant la charge supplémentaire par la puissance Phybr ;
- **Ksup4 :** interrupteur alimentant la charge supplémentaire par la puissance Phybr-Pch ;
- **Ksup5 :** interrupteur alimentant la charge supplémentaire par la puissance Ppv-Pch ;
- **Ksup6 :** interrupteur alimentant 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.

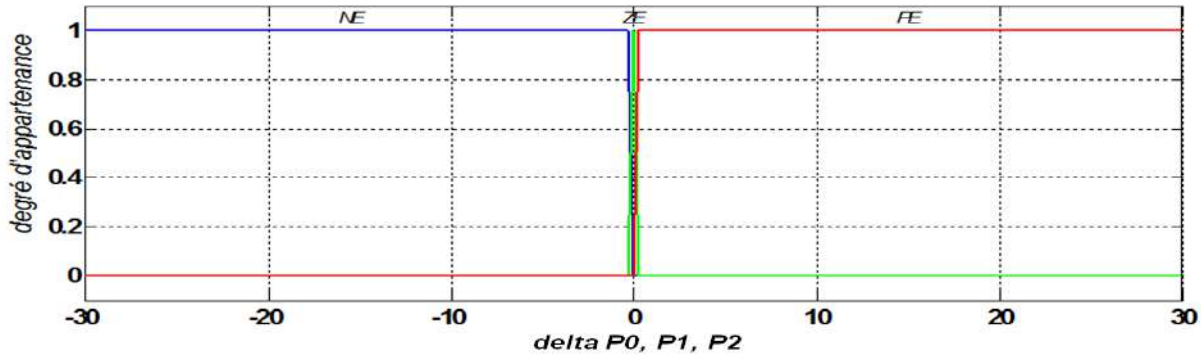



**Figure IV.5.**Fonctions d'appartenance de delta P0, P1, P2,

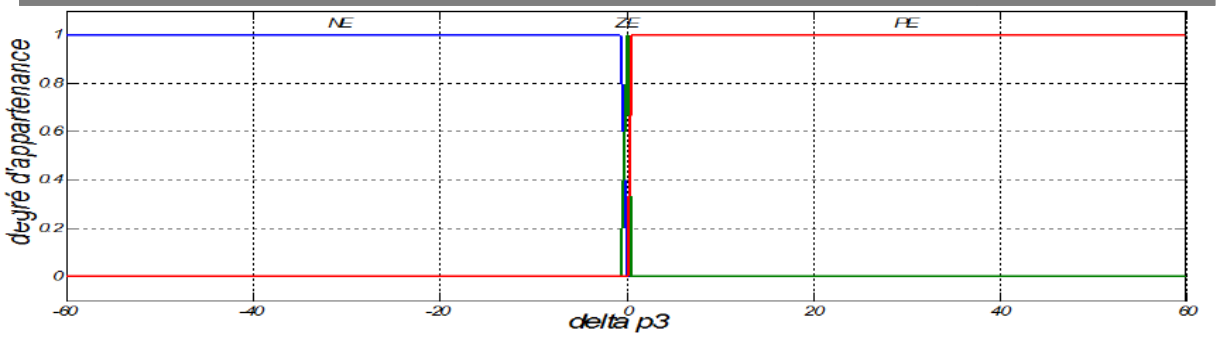



**Figure IV.6.**Fonctions d'appartenance de delta P3**.**

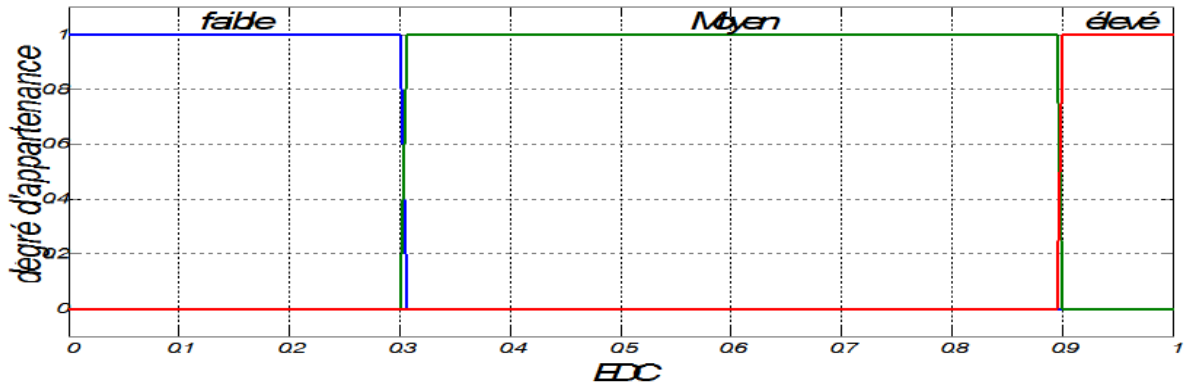



**Figure IV.7.**Fonctions d'appartenance d'EDC

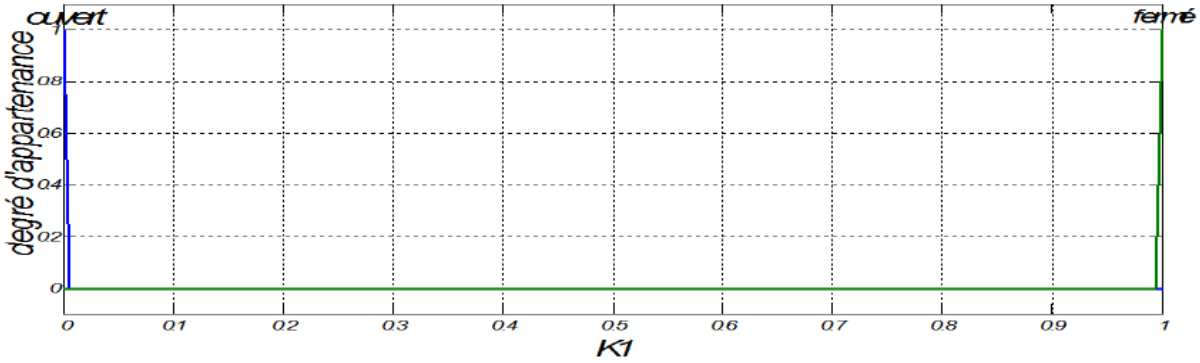



**Figure IV.8.**Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie.

### 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.

Ces 63 règles sont pondérées a partir de trois tables de 21 règles chacune qui correspondent a trois états de charges de la batterie (EDC) différent, a savoir faible, moyen et haut. Les variables de sorties linguistiques représentent l'état des interrupteurs qui prennent des soties logiques "0" et "1".

Dans les tableaux qui suivent ,nous ne représentant que les interrupteurs Kpi qui sont a l'état haut "1" ;le reste des interrupteurs est considérés a l'état bas .

Exemple de la règle du tableau 1 :

-si EDC est faible et si ΔP0 est NE et si ΔP1 est NE et si ΔP2 est NE et si ΔP3 est NE alors Kbatt3 = "1" et le reste des Kpi="0".(Kbatt3 :interrupteur charge la batterie par la puissance Phybr)

| | ΔP0 | ΔP1 | ΔP2 | ΔP3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | NE | ZE | PE |
| FAIBLE | NE | NE | NE | **Kbatt3** | **Khy** | **Khy Kbatt4** |
| | | | ZE | | **Kpv Kbatt2** | **Kpv Kbatt2** |
| | | | PE | | | **Kpv Kbatt2 Ksup5** |
| | | ZE | PE | | | **Kpv Kbatt2 Ksup5** |
| | | PE | PE | | | **Kpv Kbatt2 Ksup5** |
| | ZE | NE | NE | **Kbatt3** | **Khy** | **Khy Kbatt4** |
| | | ZE | ZE | | | **Keo Kbatt1** |
| | | PE | PE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |
| | PE | NE | NE | **Kbatt3** | **Khy** | **Khy Kbatt4** |
| | | ZE | ZE | | **Keo Kbatt1** | **Keo Kbatt1** |
| | | PE | NE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |
| | | | ZE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |
| | | | PE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |

**Tableau IV.5.**Table des règles floues pour EDC<30% (faible).

| | ΔP0 | ΔP1 | ΔP2 | ΔP3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | NE | ZE | PE |
| MOYEN | NE | NE | NE | **Kpt** | **Khy** | **Khy Kbatt4** |
| | | | ZE | | **Kpv Kbatt2** | **Kpv Kbatt2** |
| | | | PE | | | **Kpv Kbatt2 Ksup5** |
| | | ZE | PE | | | **Kpv Kbatt2 Ksup5** |
| | | PE | PE | | | **Kpv Kbatt2 Ksup5** |
| | ZE | NE | NE | **Kpt** | **Kpt** | **Khy Kbatt4** |
| | | ZE | ZE | | | **Keo Kbatt1** |
| | | PE | PE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |
| | PE | NE | NE | **Kpt** | **Khy** | **Khy Kbatt4** |
| | | ZE | ZE | | **Keo Kbatt1** | **Keo Kbatt1** |
| | | PE | NE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |
| | | | ZE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |
| | | | PE | | | **Keo Kbatt1 Kbatt6** |

**Tableau IV.6.** Table des règles floues pour 90%<EDC <30% (moyen).

| | ΔP0 | ΔP1 | ΔP2 | ΔP3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | NE | ZE | PE |
| HAUT | NE | NE | NE | **Ksup3** | **Khy** | **Khy Ksup4** |
| | | | ZE | | **Kpv Khy Ksup2** | **Kpv Ksup1** |
| | | | PE | | | **Kpv Ksup2 Ksup5** |
| | | ZE | PE | | | **Kpv Ksup2 Ksup5** |
| | | PE | PE | | | **Kpv Ksup2 Ksup5** |
| | ZE | NE | NE | **Kt Ksup5** | **Khy** | **Khy Ksup4** |
| | | ZE | ZE | | | **Khy Ksup4** |
| | | PE | PE | | | **Keo Ksup1** |
| | PE | NE | NE | **Kt Ksup5** | **Khy** | **Keo Ksup1** |
| | | ZE | ZE | | **Keo Ksup1** | **Keo Ksup1** |
| | | PE | NE | | | **Keo Ksup1** |
| | | | ZE | | | **Keo Ksup1** |
| | | | PE | | | **Keo Ksup1** |

**Tableau IV.7.** Table des règles floues pour EDC>90% (haut).

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

Le but de ce projet est d'alimenter un poste à soudé utilisé pour souder des pipelines situés dans une région isolé à Adrar dans le sud d'Algérie, par un système hybride (photovoltaïque, éolienne plus la batterie).

Pour cette raison, une étude horaire a été faite sur les conditions climatiques (l'irradiation, la température et la vitesse du vent) d'Adrar pendant la durée d'une année [67] [68][69],et qui a permis de fournir les échantillons utilises dans ce travail .

Le passage à la simulation s'est fait en fixant le temps de simulation de cette dernière à 24s ,et qui équivaut réellement équivalent à 24h.

Les conditions climatiques (l'irradiation, la température et la vitesse du vent) varient de la manière suivante :

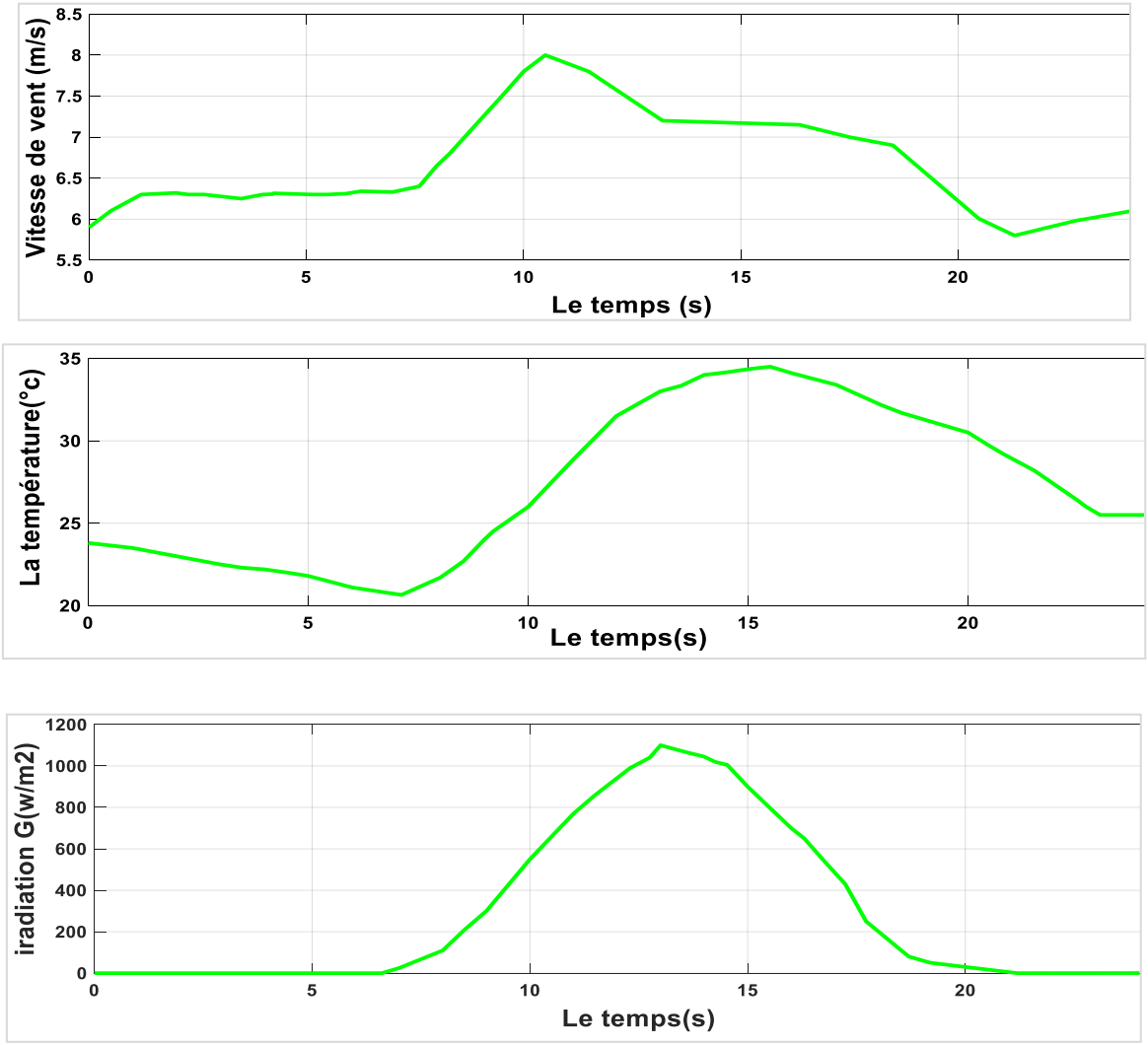
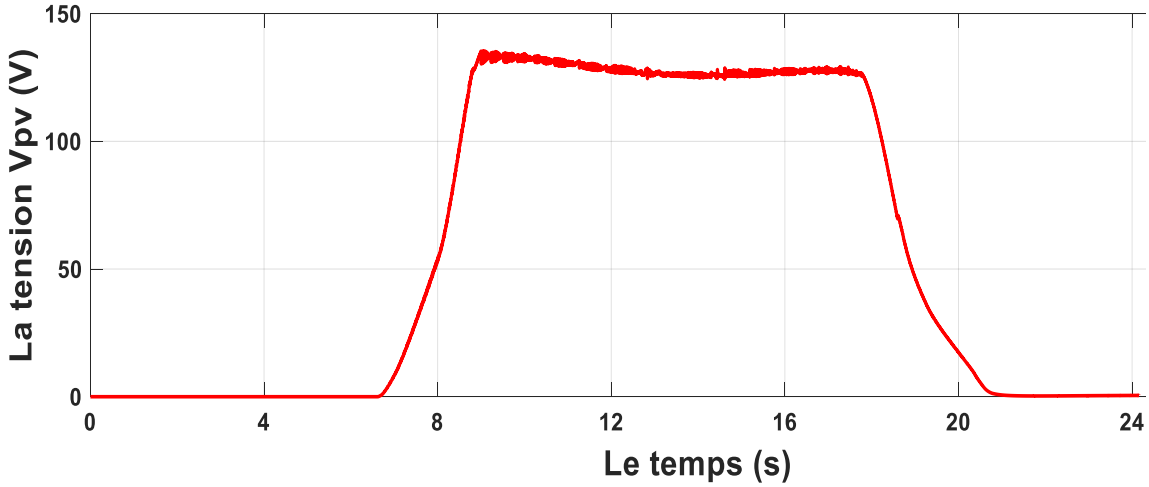



**Figure IV.9.**Evolution des données d'entrée (irradiation, température et vent).

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:




**FigureIV.10.**Evolution de la tension Vpv

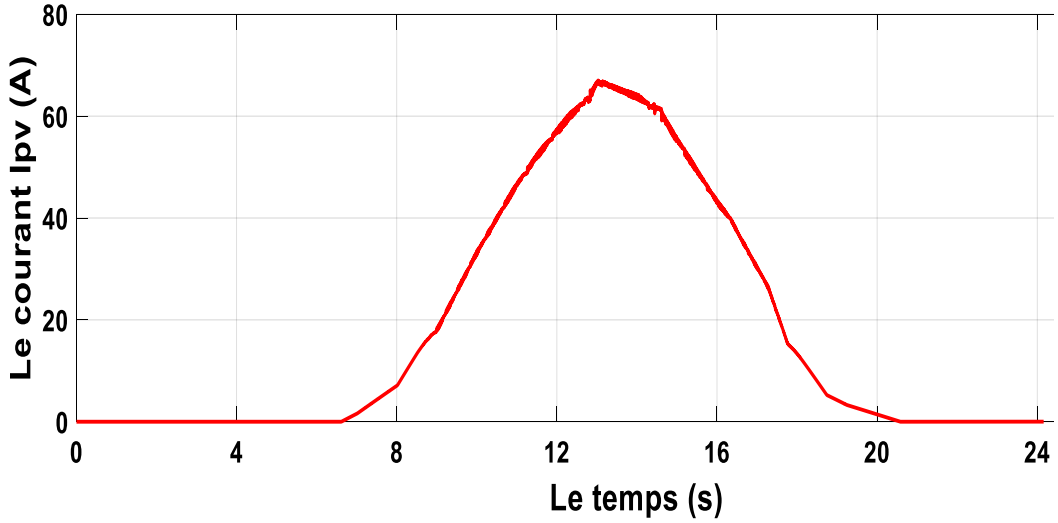



**Figure IV.11.**Evolution de courant Ipv

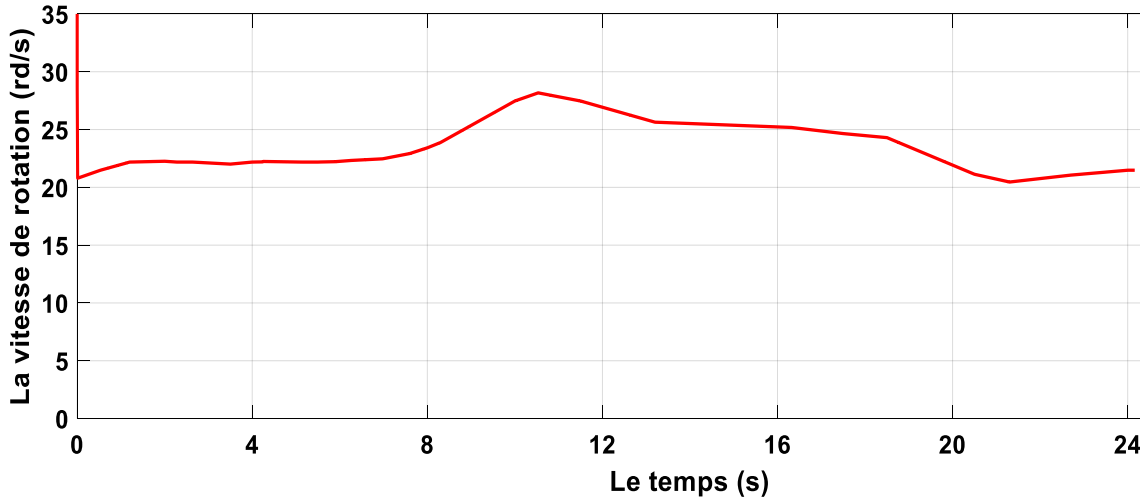



**Figure IV.12.**Evolution de la vitesse de rotation (rd/s)

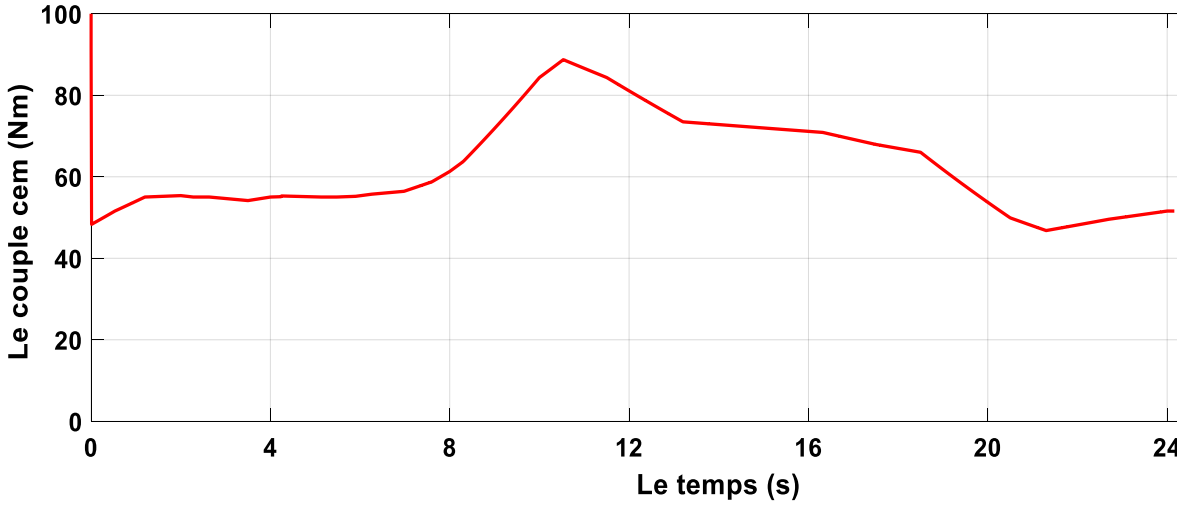



**Figure IV.13.**Evolution de couple Cem.

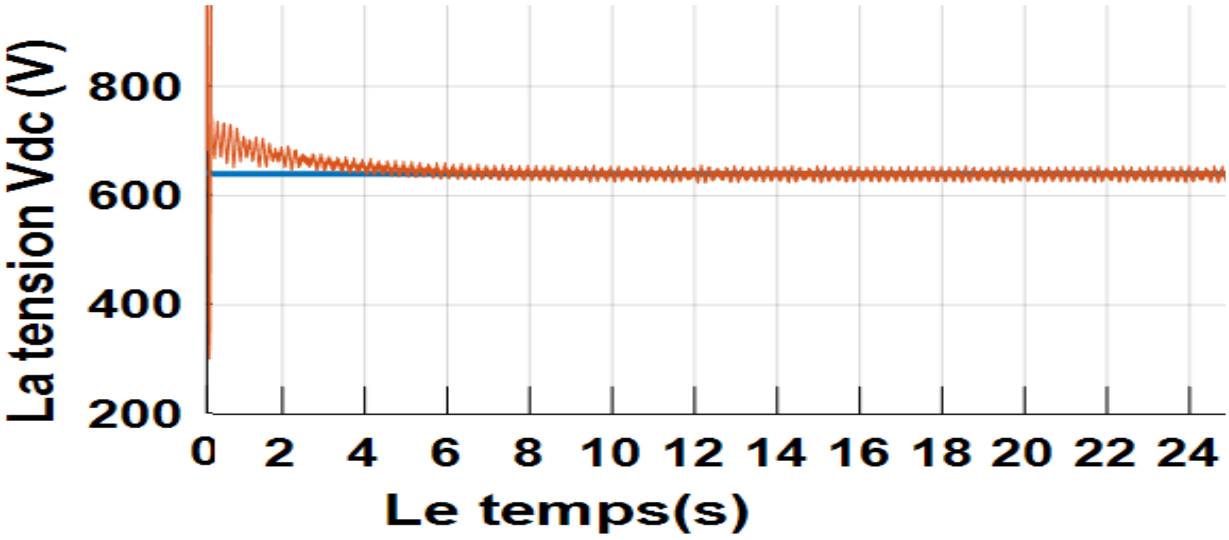



**Figure IV.14.**Evolution de la tension Vdc.

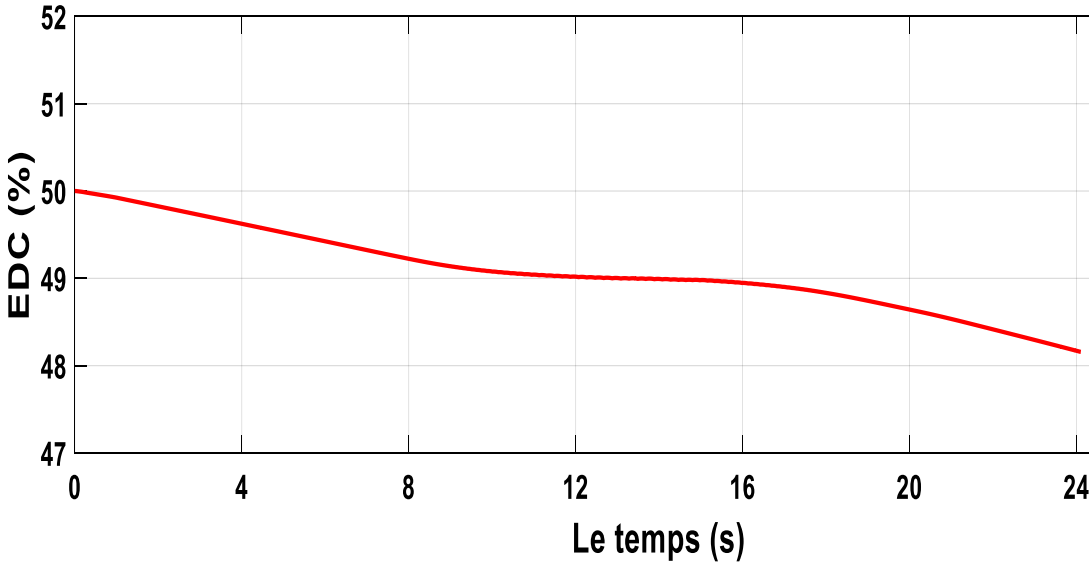



**Figure IV.15.**Evolution d'EDC.

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.

La figure IV.16 illustrée représente les deux puissances générées par le générateur éolien et photovoltaïque, et la puissance de la batterie ainsi que le profil de charge demandé.

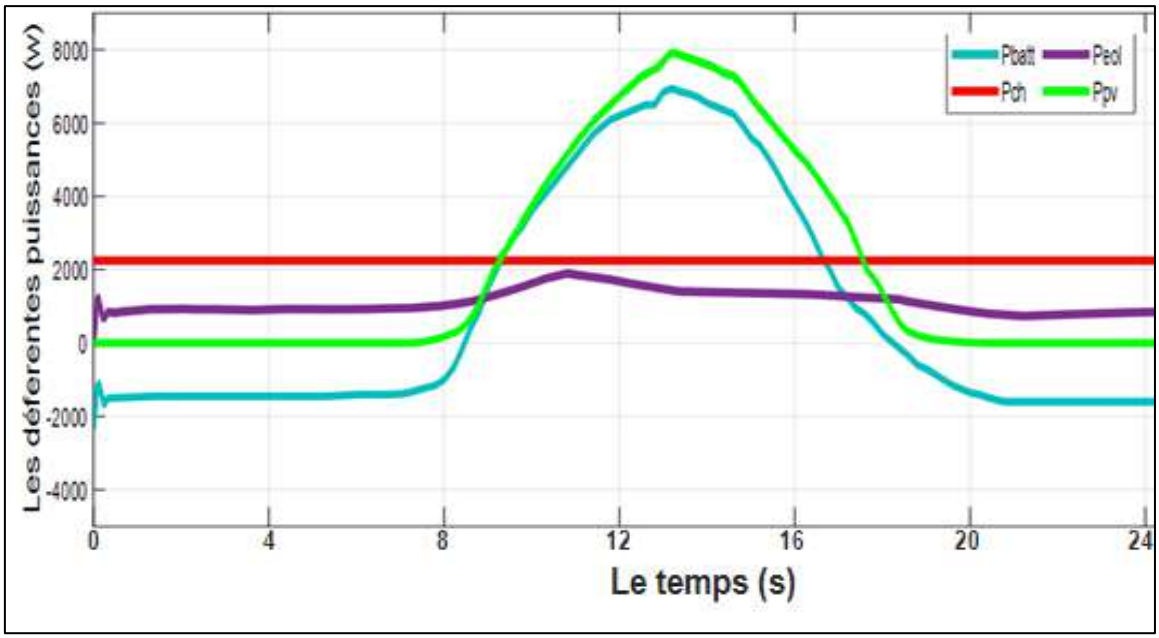



**Figure IV.16.**Profile de Pch, Ppv, Peol et P batt.

- **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.

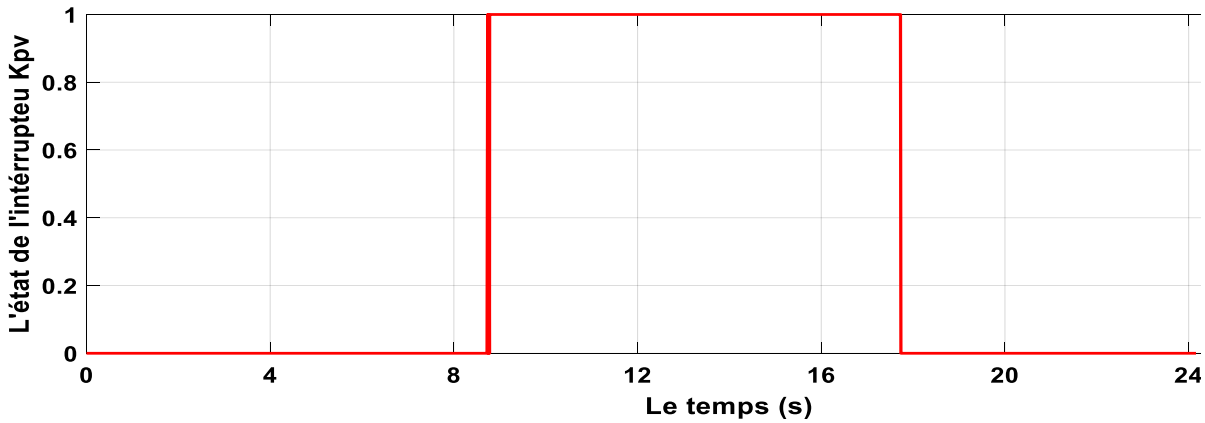



**Figure IV.17.** L'état d'interrupteur photovoltaïque.

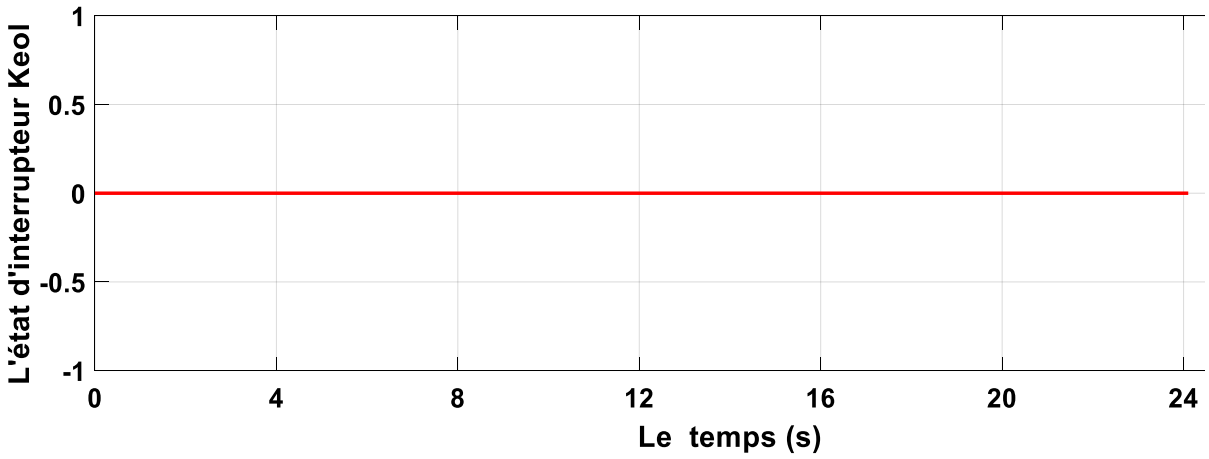



**Figure IV.18.**L'état d'interrupteur éolien

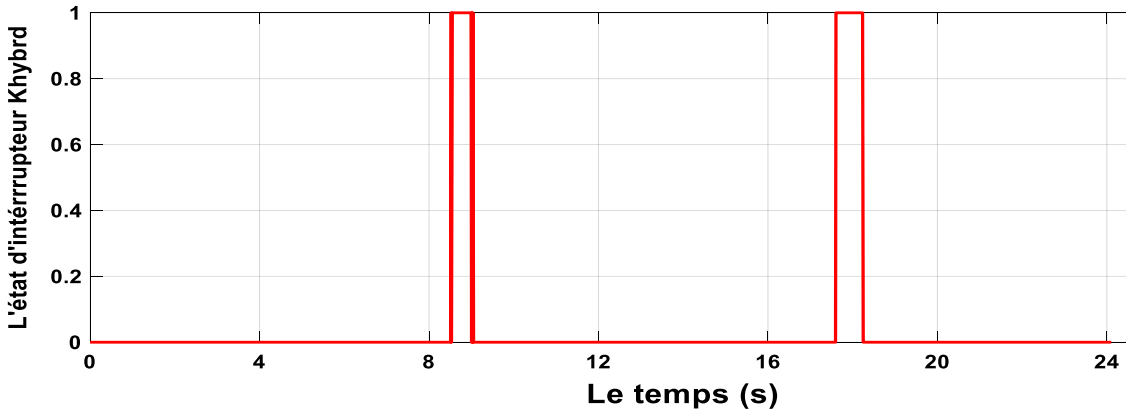



**Figure IV.19.**L'état d'interrupteur hybride

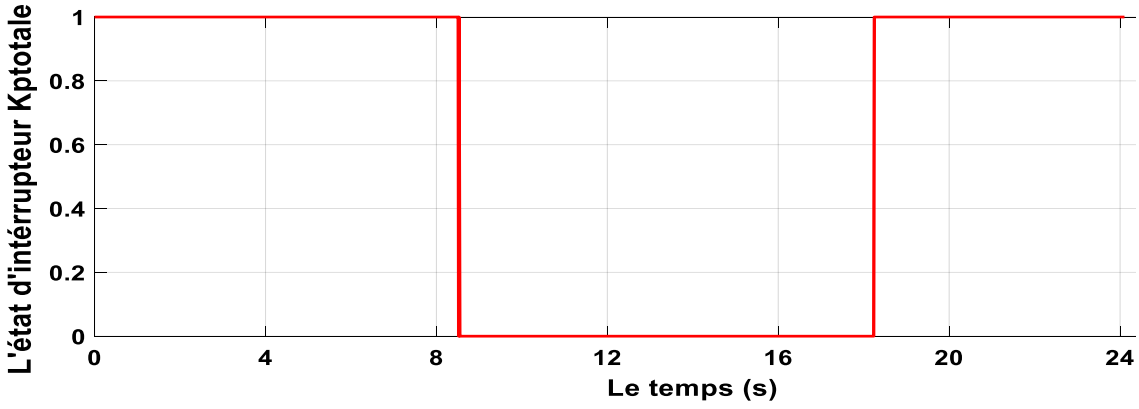



**Figure IV.20.**L'état d'interrupteur hybride et la batterie.

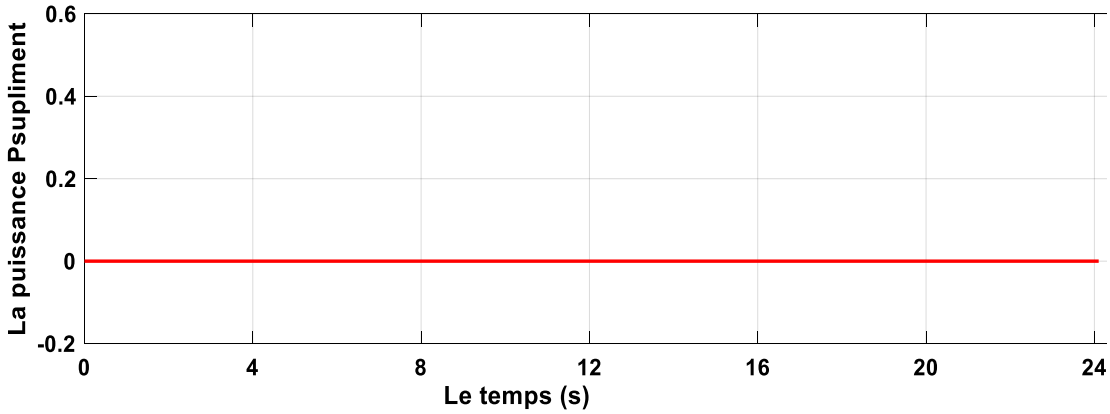



**Figure IV.21.** Puissance supplémentaire (P supliment)

**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 sera 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.

### IV.5. Régulation du courant de poste onduleur

Le procédé de soudage nécessite un courant constant élevé, plus de 100A, avec une tension en circuit ouvert très base de l'ordre de 70V [10].Pour ce faire, un onduleur de soudage de type pont complet (Full-Bridge) est utilisé. Il comprend les composants suivants, comme le montre la Figure III.24 [7][8][56].

- Deux bras, chacun comporte deux transistors IGBT avec diode en tète bèche ;
- Un transformateur a haute fréquence a point milieu, afin d'avoir une isolation galvanique et une tension basse ;il permet aussi de doubler la fréquence d'ondulation du courant de soudage, ce qui réduit la taille de l'inductance de filtrage *Ls* ;
- Un redresseur a diodes rapides (*UDF1 et UDF2*)
- Une bobine de lissage de courant *Ls* est nécessaire.

Le principe de fonctionnement de poste onduleur est donné par la figure III.29, ainsi la tension du bus continu $V_{DC}$ est hachée par le pont complet (Full Bridge) composé de transistors de puissance (IGBT) à des fréquences qui peuvent être de l'ordre de 20KHz, on obtient alors une tension alternatif .Cette dernière est alors abaissée par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé qui permet d'élever le courant, un redresseur à pont de diode fournit le courant de soudage après le lissage [9][58]..

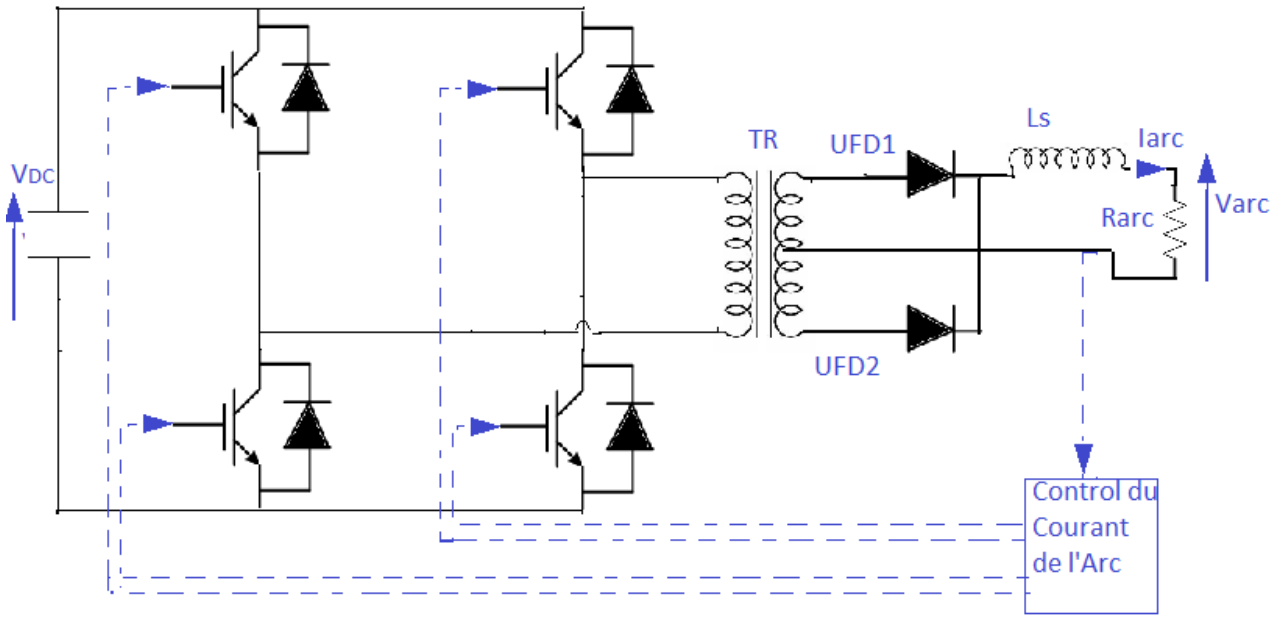



**Figure III.22.**Principe de fonctionnement du poste à soudé onduleur.

Dans notre système la charge est de type continu, c'est un poste à souder 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 le tableau (voir annexe).

La figure III.30 présente un système de régulation du courant de l'arc basé sur un régulateur classique de type PI pour avoir un courant stable a la sortie.

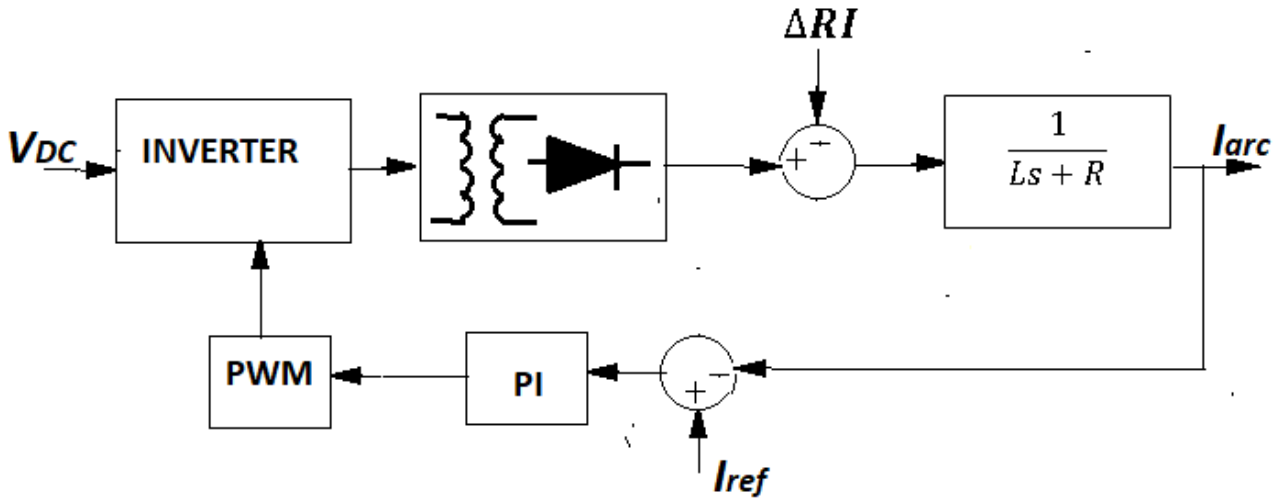



**Figure III.23.** Bloc de régulation du courant de soudage.

Vu la fluctuation de la longueur de l'arc, il est nécessaire de tenir compte d'une perturbation sur la résistance de l'arc ($\Delta RI$) durant la procédure de soudage afin d'éviter toute erreur. Cette perturbation est généralement due aux fluctuation dans la distance entre la torche de soudage (l'électrode) et les pièces a souder.

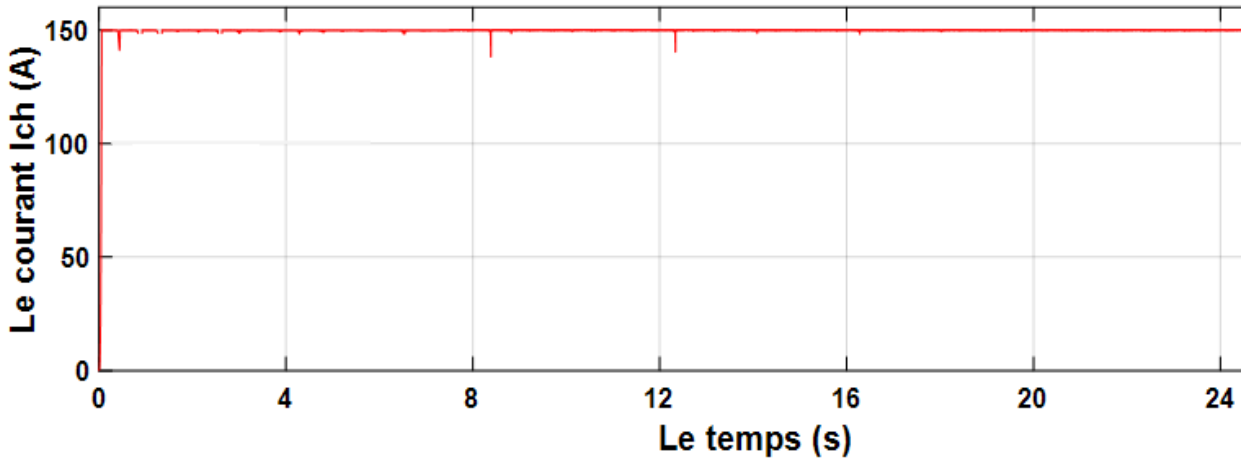



**Figure IV.24.**Evolution de courant de charge

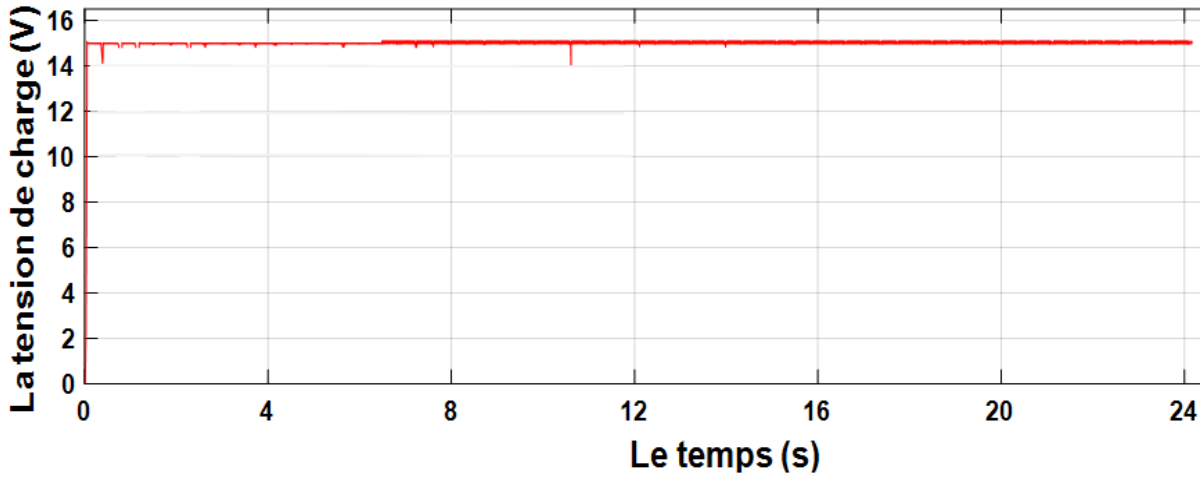



**Figure IV.25.**Evolution de la tension de charge

**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.

Ainsi, nous avons pu concevoir un schéma d'un générateur de soudage a l'arc a base d'une petite éolienne de 8.5KW et d'un GPV de 8KW . Le générateur proposé en effet peut fonctionner de manière autonome .sans besoin du réseau électrique, grâce a sa conception optimale . Au niveau de l'étage de soudage, nous avons utilisé un onduleur de soudage a architecture en pont complet afin de contrôler le courant de l'arc pour satisfaire la demande de la charge a tout moment dans de bonnes conditions de fonctionnement. Tout le système a été modélisé puis simulé sous Matlab/Simulink. Les résultats de simulation ont montré la faisabilité et l'efficacité du soudage proposé.

# Conclusion Générale

Dans sites isolés non desservis par le réseau électrique de distribution, le diesel reste encore la source énergétique majoritaire pour la production électrique. Cependant, ce type pose énormément de problèmes techniques, économiques et environnementaux. Dans la présente thèse, l'objectif principal de ce travail était d'élaborer la commande d'un système hybride autonome : photovoltaïque/éolien et une batterie et de développer un algorithme de gestion d'énergie afin d'alimenter une charge isolée sans interruption, en adoptant une charge principale pour les applications de soudage a l'arc (un poste à soudé onduleur) et des charges auxiliaires dans la région d'Adrar au sud de l'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 pu concevoir un générateur de soudage a l'arc en se basant sur un système hybride a génératrice synchrone a aimant permanent GSAP a entrainement direct et d'un générateur photovoltaïque GPV. Il a été notée que la chaine de conversion hybride proposée est plus économique et plus adaptée aux applications de soudage, en raison du nombre minimales de convertisseurs de puissances utilisés. Généralement, on n'a pas besoin d'installer un onduleur pour convertir la tension alternatif, vu que le poste a souder est une alimentation a courant continu ( DC).

En revanche, le problème de fluctuation ou d'absence de la production éolienne et/ou photovoltaïque a été résolu par trois systèmes. Le premier système consiste a mettre en place des batteries de stockage en plomb-acide, afin de rendre le système autonome. En effet, la batterie est un élément indispensable sans doute dans notre système ; elle emmagasine l'excès d'énergie produite ;puis elle contribue a satisfaire la demande de l'arc aux moment d'insuffisance ou d'absence de l'énergie. Le second système consiste a optimiser la puissance produite à travers l'implémentation de la (MPPT) point de poursuite maximale. Le troisième système repose entièrement sur la gestion déterministe de la logique floue adoptée.

Nous avons aussi établi les modèles mathématiques qui décrivent le comportement des différentes parties du SEH avec un processus de la charge/décharge de la batterie et la régulation de

courant de la charge. Le logiciel Matlab/Simulink, a été utilisé à cet effet. Les résultats obtenus nous permettent de valider ces commandes. Nous avons proposer 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 ;

D'autre part, le soudage à l'arc nécessite une tension a vide assez faible de 50 a 70V, avec une importante intensité de courant, de plusieurs ampères. A cet effet, un pont un onduleur de soudage a topologie de pont complet(H) a été adoptée dans cette these pour le procède SMAW (Soudage a l'arc a électrode enrobée), car ce type d'onduleur répond pleinement aux exigences de postes a souder modernes. Les onduleurs de soudages sont des convertisseurs de puissances DC /DC a découpage utilisant des transformateurs abaisseurs en ferrite pour fonctionner en haute fréquence. Ce type d'onduleur permet de diminuer considérablement le volume et le poids de l'équipement de soudage ;il permet également de mieux contrôler les paramètres électriques de soudage tels que la tension, le courant et ces formes d'ondes. Du coté commande, nous avons utilisé un régulateur PI pour maintenir le courant de soudage constant, tout en tenant compte des perturbations au niveau de la résistance de soudage, qui sont généralement dues au changement de la longueur de l'arc.

Le générateur de soudage propose avec tout ses composants hybride, la batterie de stockage, l'onduleur de soudage et les autres convertisseurs de puissances, a été simulé à l'aide de l'outil Matlab/Simulink. Les résultats de la simulation prouvent également la faisabilité et l'efficacité du système proposée. Selon ces résultats, le système hybride peut remplacer le groupe de soudage actuellement utilisees dans les sites isolées ;donc mettre fin au diesel.

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]** "Programme de développement des énergies renouvelables de l'Algérie en 2015-2030,"http:/www.sonelgaz.dz.

**[2]**N.Mendis,K.M.Muttaqi,Sayeef,and S.Perera, "Standalone Operation of Wind Turbine-Based Variable Speed Generators With Maximum Power Extraction Capability, "IEEE Transctions on Energy Conversion,vol.27,no.4,pp.882-834,2012.

**[3]** H. Kamelia, "Modélisation D'une Cellule PV : Etude Comparative", Mémoire De Magister,Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou,2012..

**[4]**J.Shklovski and K.Jason, "Development of constant power source for arc welding, "in 2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference,2012,pp.255-258.

**[5]**J.-r.Yan,H.-K.Liu,P.Liao,L.Gan,and l.-j.Liu "H2/H∞ Robust Controller of the arc Welding Inverter Power, "JCP,vol.6,no.4,pp.705-710,2011.

**[6]** B.Boussiala,L. Nezli ,M.O.Mahmoudi,and A.Deboucha, "Novel welding machine based on small PMSG wind turbine, "Journal of Renewable and sustainable Energy,vo.10,no.5p.053304,2018.

**[7]**A.C,Davies,The science and Practice of Welding,volume 1,Welding science and technologie,10th ed.Cambridge University Press, 1992.

**[8]**A.Navarro-Crespin,V.M.Lopez,R.Casanueva,and F.J.Azcondo, "Digital Control for Arc Welding Machine Based on Resonant Converter and Synchronous Rectification,"IEEE Transctions on Industry Informatics,vol.9,no.2,pp.839-847,2013.

**[9]**B.Boussiala,M.O.Mahmoudi,and Nezli, "Study and control of PWM arc welding inverter based on a microcontroller , "presented at the 2nd Internationnal Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN),Antalya,Turquie,2015.

**[10]**F.D.Bianchi,H.de Battista,and R.J.Mantz , Wind Turbine Control Systems :Principales, Modelling and Gain Scheduling Design .Springer London,.

**[11]** B.Boussiala,L. Nezli ,M.O.Mahmoudi,and A.Deboucha, "Novel welding machine based on small PMSG wind turbine, "Journal of Renewable and sustainable Energy,vo.10,no.5p.053304,2018.

**[12]**A.Peterson,Analysis,modeling and control of doubly-fed induction gerenators for wind turbines.Chalmers University of Technlogy,2005.

**[13]**I.Munteanu,A.I.Bractu,N.-A.Cutululis,and E.Ceanga, Optimal control of wind energy systems:towards a global approach,Springer Science & Business Media,2008.

**[14]**T.Ackerman,Wind Power in power systems. John Wiley & Sons,2005.

**[15]**F.Bianchi,H.de Battista,and R.J.Mantz,Wind Turbine Control Systems:Principales, Modelling and Gain Schelduling Desing.Springer London,2007.

**[16**] 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.

**[17]** L.Barote,C.Marinescu,amd M.N.Cirstea, " Control Structure for Singl-Phase-Alone Wind-Based Energy Sources, "IEEE Transctions on Industrial Electronics,vol.60,no.2,pp.764-772,2013.

**[18]** C.Lumbreras,J.M.Gierrero,P.Garcia,F.Briz,and D.D.reigosa, "Control of a Small Wind Turbine in The High Wind Speed Region, "IEEE Transctions on Power Electronics,vol.31,no.10,pp.6980-6991,2016

**[19]**W.Xiao, « A Modifed Adaptative Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems», université de Columbia, 2003.

**[20]**A.Bendre,G.Venkataramanan,and D.Divan "Dynamic analysis of loss-limited switching full-biridge DC-DC converter with multimodal control,"IEEE Transctions on Industry Application,vol.39,no.3,pp.854-863,2003.

**[21]**S.Narula,B.Singh,G.Bhuvaneswari, and R.Pandey. "Improved Power Quality Bridgeless Converter-Based SMPS for Arc Welding, "IEEE Transctions on Industrial Electronics,vol.64,no.1,pp.275-284,2017.

**[22]**S.Narula,B.Singh,G.Bhuvaneswari, and B.Singh. "A modular converter for welding power supply with improved power quality, "in International conference on power electronics,Drives and Energy Systems (PEDES), 2012.pp.1.4.

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

**[24]** 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.

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

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

**[27]** 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.

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

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

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

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

**[32]** S.Mezzai, K. Tadjine, "Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) ". Mémoire de

Master en Energies renouvelable, Université A. Mira, Bejaia, Algérie 2015.

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

**[34]** 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.

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

**[36]** 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.

**[37]** 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.

**[38]** 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.

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

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

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

**[43]** 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.

**[44]** 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.

**[45]** 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.

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

**[47]** 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.

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

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

**[50]** 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.

**[51]** Z.Hassiba,L.Cherif,and M.Ali, "Optimal Operational Strategy of Hybrid Renewable Energy Systemfor Rural Electrification of a Remote Algeria, "Energy Procedia,vol.36,pp.1060-1069,01/01/2013.

**[52]** 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.

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

**[54]** 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.

**[55]** 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.

**[56]** 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.

**[57]** 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.

**[58]** 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.

**[59]** 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.

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

**[61]**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.

**[62]** L.Shanzhi,W.Haoping,T.Yang,and A.Aitouche, "A RBF neural network based MPPT method for variable speed wind turbine system, "IFAC-Papers On Line,vol.48.no.21,pp.244-250,2015.

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

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

**[65]** 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.

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

**[67]** 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.

**[68]**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.

**[69]**B.Boussiala,A.Boutaghane ,and M.Ouadah, " Contribution de Certains Formalismes Vectoriels a la Modélisation des Machines Asynchrones aux postes de soudage a l'arc "presented at the conférences Internationale de soudage, le CND et l'industrie des Métaux ,IC-WNDT-MI,14,Annaba,Algérie,2014.

# 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 | ∅ | 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 |

**Tableau IV.9**. Paramètres de l'onduleur de soudage

| | |
|---|---|
| Courant de l'arc maximale | 200A |
| Tension de soudage a vide | 65V |
| Resistance de l'arc | 0.1Ω |
| Inductance de lissage | 200µH |
| Rapport cyclique | 0-40% |