**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**
**UNIVERSITE DE MOULOUD MAAMERI TIZI OUZOU**

**FACULTE DE GINIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE**

**DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE**

**THESE DE DOCTORAT- LMD**

Spécialité
**AUTOMATIQUE**

Présenté par
**BOUGUERRA Zahira**

Sujet

# Etude et application des convertisseurs électriques alimentés par deux sources d'énergie renouvelable

Soutenue le 02/05/2023 devant le jury d'examen composé de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| M ELLAH Rabah | Professeur | UMMTO, Tizi Ouzou | Président |
| BENFDILA Arezki | Professeur | UMMTO, Tizi Ouzou | Rapporteur |
| KAABECHE Abdelhamid | Directeur de recherche | CDER, Alger | Examinateur |
| BENAZOUZ Djamel | Professeur | UMBB, Boumerdes | Examinateur |
| LAKHLAF Ahcene | MCA | UMMTO, Tizi Ouzou | Examinateur |

# Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire de micro-électronique et nanotechnologies, université de Mouloud Memmri, Tizi Ouzou.

Mes remerciements avant tout, à mon dieu, le tout puissant, pour le courage, la volonté et la patience qu'il m'a donné durant ces longues années d'étude afin que je puisse arriver à cet étape.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur Arezki BENFDILA, professeur à l'université de Mouloud Memmri, Tizi Ouzou pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail.

Mes remerciements les plus particuliers, s'adressent à monsieur Rabeh MELLAH, professeur à l'université de Mouloud Memmri, Tizi-Ouzou, d'avoir accepté de juger ce travail et de présider le jury de ma thèse.

Je tiens à remercier plus particulièrement monsieur Abedlhamid KAABECHE, professeur au centre de développement des énergies renouvelables CDER, pour son soutien et conseils durant et après mon stage au centre et pour l'honneur qui 'il m'a fait en acceptant d'examiner ce travail présenté et de siéger dans ce jury.

Je remercie également monsieur Djamel BENAZZOUZ, professeur à l'université de Boumerdes, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur Ahcene LAKHLEF maitre de conférences A, à l'université de Mouloud Memmri, pour l'aide qu'il m'a apporté durant toute la préparation de cette thèse.

## Abréviation

| | |
|---|---|
| PV | Photovoltaïque |
| WT | Wind turbine |
| WECs | Wind energy conversion system |
| RE | Energie renouvelable |
| GSAP | Génératrice synchrone à aimants permanant |
| PPM | Point de puissance maximale |
| FLC | Fuzzy logic control |
| DC | Courent continu |
| AC | Courent alternatif |
| HAWT | Horizontal axis Wind turbine |
| VAWT | Vertical axis Wind turbine |
| BIWT | Builiding integrated wind turbine |
| BIPV | Builiding integrated photovoltaic |
| BAPV | Bâtiment attached Photovoltaïque |
| BIPVWT | Builiding integrated photovotaic and wind turbine |
| MAS | Masynchrone |
| GADA | Génératrice asynchrone à double alimentation |
| SEIG | Système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage |
| $P_n$ | Puissance nominale |
| $V_n$ | Vitesse nominale |
| $V_d$ | La vitesse de démarrage |
| $V_m$ | Vitesse maximale du vent |
| u | Rapport cyclique |
| INC | Conductance incrémentale |
| P&O | Perturbe and observe |
| FF | Le facteur de forme |
| PLL | Phase Locked Loop |
| PI | Régulateur Proportionnel Intégral |
| MLI | Modélisation de largeur d'impulsion |
| MPPT | Maximum power point tracknig |

## Liste des symboles

| | |
|---|---|
| E | Rayonnement solaire ($W/m^2$) |
| $E_{ph}$ | Energie de photon |
| $\lambda_{ond}$ | Longueur d'onde |
| $h$ | Constante de Planck ( $6.62 * ²10^{-34} JS^{-1}$) |
| $c$ | Célérité de la lumière ($3 * 10^8 mS^{-1}$) |
| $I_{ph}$ | Photo-courant (A) |
| $q$ | La charge d'électron $e$ =$1.6 * 10^{-19} C$ |
| $I_0$ | Le courant de saturation (A) |
| $K$ | La constante de Boltzman ($1.8354 * 10^{-23} JK^{-1}$) |
| $E_g$ | La tension de seuil de diode (V) |
| $n$ | Le facteur de qualité de diode |
| C | Capacité ($\mu F$) |
| $I_{sc}$ | Le courant de court circuit (A) |
| $V_{oc}$ | Tension de circuit ouvert (V) |
| $\eta$ | Le rendement |
| $N_s$ | Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série |
| $N_p$ | Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle |
| $V_{pv}$ | La tension photovoltaïque (V) |
| $I_{pv}$ | Le courant photovoltaïque (A) |
| $e_{pv}(k)$ | L'erreur photovoltaïque du régulateur flou |
| $de_{pv}(k)$ | La dérivée de l'erreur photovoltaïque |
| $P_g$ | La puissance active du réseau (W) |
| $Q_g$ | La puissance active du réseau (VAR) |
| $L_f$ | L'inductance de filtre (H) |
| $R_f$ | La résistance de filtre (Ω) |
| $\omega_s$ | Pulsation de réseau (Hz) |
| $V_{sd}$, $V_{sd}$ | La tension dq référence (V) |
| $I_{sd}$, $I_{sd}$ | Courant de ligne dans dq référence (A) |
| $P_{vent}$ | L'énergie cinétique du vent |
| $S$ | La surface balayée par les pales ($m^2$) |
| $P_{\max-eol}$ | Puissance maximale (W) |

| | |
|---|---|
| $C_p$ | Coefficient de puissance |
| $C_P^{opt}$ | Coefficient de puissance optimal |
| $P_{eol}$ | Puissance éolienne (W) |
| $V_{vent}$ | Vitesse de vent (m/s) |
| $\lambda$ | La vitesse spécifique |
| $\omega_r$ | Vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s) |
| $\beta$ | Angle de calage des pales en degré |
| R | Rayon des pales de l'éolienne(m) |
| $\rho$ | Densité spécifique de l'air (Kg/m$^3$) |
| p | Nombre de pair de pôles |
| $J_t$ | Inertie de la turbine (kg.m) |
| $f$ | Friction (N/rad/s) |
| $V_{sa}$, $V_{sb}$, $V_{sc}$ | Les tentions statorique de GSAP (V) |
| $V_a$, $V_b$, $V_c$ | Les tentions de réseau (V) |
| $I_a$, $I_b$, $I_c$ | Les courants de réseau (A) |
| $I_{sa}$, $I_{sb}$, $I_{sc}$ | Les courants statorique de GSAP (A) |
| $\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$ | Les flux statorique de GSAP |
| $R_s$ | Résistance statorique (Ω) |
| $\emptyset_f$ | Représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct |
| $U_{GSAP}, I_{GSAP}$ | Les valeurs efficaces de la tension et du courant de GSAP |
| $L_{pv}$ | Inductance de l'hacheur photovoltaïque (H) |
| $L_w$ | Inductance de l'hacheur éolien (H) |
| $e_w(k)$ | L'erreur éolienne du régulateur flou |
| $de_w(k)$ | La dérivée de l'erreur éolienne |
| $K_i$ | Gain Integral |
| $K_p$ | Gain Proportional |
| $T_{are}$ | Le couple aérodynamique (N.m) |
| $T_{em}$ | Le couple électromécanique de GSAP |

# Liste des figures

Figure I. 1 Production et consommation mondiale d'électricité en 2020 ....4
Figure I. 2 Evaluation mondiale de la consommation d'énergie et des émissions de CO2....5
Figure I. 3 Les nouvelles capacités renouvelables installées dans le monde ....5
Figure I. 4 l'origine des énergies renouvelables....6
Figure I. 5 L'énergie hydraulique....7
Figure I. 6 L'énergie marine ....8
Figure I. 7 La géothermie....9
Figure I. 8 Diagrammes de la fabrication de l'énergie biomasse ....10
Figure I. 9 L'énergie photovoltaïque ....10
Figure I. 10 Rayonnement solaire dans le monde (annuelle et journalière moyenne) ....11
Figure I. 11 La carte d'irradiation en Algérie ....11
Figure I. 12 L'énergie éolienne....12
Figure I. 13 Carte du vent en Algérie....13
Figure I. 14 Classification des systèmes hybrides ....14
Figure I. 15 Système hybride à bus continu (DC) ....15
Figure I. 16 Système hybride à bus alternatif (AC) ....16
Figure I. 17 Système hybride à deux bus (DC, AC) ....16
Figure II. 1 le spectre du rayonnement solaire .... 20
Figure II. 2 L'effet photovoltaïque ....21
Figure II. 3 Topologies de système photovoltaïque ....23
Figure II. 4 Classifications des onduleurs PV connecté au réseau électrique....24
Figure II. 5 Circuit équivalent de la cellule solaire....26
Figure II. 6 Structure d'un module photovoltaïque au silicium cristallin ....29
Figure II. 7 Caractéristique résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en sérié ....30
Figure II. 8 Caractéristique résultantes d'un groupement de (Np) cellules en parallèle ....30
Figure II. 9 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques du module photovoltaïque à T=25°C ..31
Figure II. 10 Influence de la température sur les caractéristiques module photovoltaïque à G=100°C .31
Figure II. 11 Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques ....32
Figure II. 12 L'ongle d'inclinaison optimale de panneaux solaires selon la position d'installation ....33
Figure II. 13 La distance minimale entre les rangées solaire ....34
Figure II. 14 Synthèse de la commande MPPT d'un générateur photovoltaïque ....35
Figure II. 15 Hacheur élévateur....35
Figure II. 16 Principe de fonctionnement de P&O ....37
Figure II. 17 Principe de fonctionnement de la méthode INC....37
Figure II. 18 Schéma bloc de synthèse d'un régulateur flou....38
Figure II. 19 Synthèse du contrôleur flou de système PV....39
Figure II. 20 Fonction d'appartenance de *e* et *de* ....39
Figure II. 21 Fonction d'appartenance de *du*....39
Figure II. 22 Modèle de réseau dans le repère dq....41
Figure II. 23 Le controleur PLL ....43
Figure II. 24 Synthèses la commande de l'onduleur....44
Figure II. 25 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique ....44

Figure II. 27 Profile de la puissance de charge....46
Figure II. 28 Profile de l'ensoleillement....46
Figure II. 29 Les puissances de l'onduleur....46
Figure II. 30 Les puissances du réseau....46
Figure II. 31 Le courant photovoltaïque....46
Figure II. 32 La tension continue....46
Figure II. 33 La tension de charge....47
Figure II. 34 Le courant de charge....47
Figure II. 35 Les harmoniques de courant....47
Figure II. 36 Le facteur de puissance de l'onduleur....47
Figure III. 1 Eolienne darrieus....50
Figure III. 2 Eolienne Savonius....51
Figure III. 3 Eolienne à axe horizontal....51
Figure III. 4 Puissances en fonction du diamètre de l'éolienne....52
Figure III. 5 Composants d'une éolienne....52
Figure III. 6 Système éolienne basé sur une machine à vitesse fixe....54
Figure III. 7 La chaine de conversion éolienne à la base de GADA....55
Figure III. 8 Les différentes topologies de la chaine de conversion éolienne à la base de GSAP [21]..56
Figure III. 9 Parc d'éolien onshore....58
Figure III. 10 Parc d'éolien offchore....59
Figure III. 11 Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent....60
Figure III. 12 Le réglage par l'ongle de calage....60
Figure III. 13 Moteur électrique pour le control de pas....61
Figure III. 14 Chaine de conversion éolienne....62
Figure III. 15 Tube de courant auteur d'un éolien....63
Figure III. 16 La puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation....64
Figure III. 17 Courbes caractéristiques Cp (λ) pour plusieurs valeurs de β....65
Figure III. 18 Schéma block de la turbine....65
Figure III. 19 Représentation de la génératrice synchrone a aiment permanant GSAP....66
Figure III. 20 Structure de la génératrice synchrone....67
Figure III. 21 Pont de redresseur triphasé....69
Figure III. 22 Hacheur élévateur....70
Figure III. 23 Le principe de fonctionnement PMM....71
Figure III. 24 Schéma bloc de contrôleur flou....71
Figure III. 25 Les fonctions d'appartenance de $(ew, dew, duw)$....72
Figure III. 26 Régulateur flou de l'angle de calage....72
Figure III. 27 Parc éolien terrestre....73
Figure III. 28 La puissance demandée....74
Figure III. 29 Profile du vent des turbines 1, 2....74
Figure III. 30 Les puissances des turbines 1, 2....74
Figure III. 31 Profile du vent des turbines 3, 4....74
Figure III. 32 Les puissances des turbines 3, 4....75
Figure III. 33 Profile du vent des turbines 5, 6....75
Figure III. 34 Les puissances des turbines 5, 6....75
Figure III. 35 Les puissances éoliennes....75
Figure III. 36 Les puissances du réseau....75
Figure III. 37 La tension continue....75

Figure III. 38 Les vitesses de rotations ..... 76
Figure III. 39 La tension de charge ..... 76
Figure III. 40 Le courant de charge ..... 76
Figure III. 41 Le facteur de puissance ..... 76
Figure III. 42 Les harmoniques de courant ..... 76
Figure IV. 1 Turbines à axe horizontal montées sur un toit d'un bâtiment ..... 80
Figure IV. 2 Turbines à axe vertical ..... 81
Figure IV. 3 Des turbines intégrées dans le bâtiment ..... 81
Figure IV. 4 Des turbines augmentés dans le bâtiment ..... 82
Figure IV. 5 Des turbines intégrées et augmentées dans le bâtiment ..... 83
Figure IV. 6 Des toits traditionnels ..... 84
Figure IV. 7 Cellule flexible en feuille ..... 85
Figure IV. 8 Les tuiles BIPV ..... 86
Figure IV. 9 Des modules PV augmentés dans le bâtiment ..... 86
Figure IV. 10 Vitrages photovoltaïques ..... 87
Figure IV. 11 Des modules PV augmentés dans le bâtiment ..... 87
Figure IV. 12 Système hybride (photovoltaïque et éolien) installé dans le bâtiment ..... 88
Figure IV. 13 Topologies de système hybride ; (a) la connexion DC, (b) la connexion AC ..... 89
Figure IV. 14 Topologies de raccordement de système hybride au bus DC, (a) MPPT individuel, (b) MPPT commun ..... 90
Figure IV. 15 Schéma de principe du système hybride ..... 90
Figure IV. 16 La puissance demandée ..... 92
Figure IV. 17 Profile du vent ..... 92
Figure IV. 18 Le profile d'ensoleillement ..... 92
Figure IV. 19 Le courant photovotaïque ..... 93
Figure IV. 20 Le courant éolien ..... 93
Figure IV. 21 La puissance photovoltaïque ..... 93
Figure IV. 22 La puissance éolienne ..... 93
Figure IV. 23 Les puissances de l'onduleur ..... 93
Figure IV. 24 Les puissances du réseau ..... 93
Figure IV. 25 La tension continue ..... 94
Figure IV. 26 Le facteur de puissance de l'onduleur ..... 94
Figure IV. 27 Le courant de charge ..... 94
Figure IV. 28 La tension de charge ..... 94
Figure IV. 29 Les harmoniques de courant ..... 94
Figure IV. 30 Les harmoniques de tension ..... 94
Figure IV. 31 Système hybride connecté au réseau avec un seul MPPT control ..... 95
Figure IV. 32 Les puissances de l'onduleur ..... 96
Figure IV. 33 Les puissances du réseau ..... 96
Figure IV. 34 La puissance photovoltaïque ..... 96
Figure IV. 35 La puissance éolienne ..... 96
Figure IV. 36 Les courants photovoltaïque ..... 97
Figure IV. 37 Le courant éolien ..... 97
Figure IV. 38 La vitesse de rotation de GSAP ..... 97
Figure IV. 39 La tension continue ..... 97

Figure IV. 40 Le courant de charge .....97
Figure IV. 41 La tension de charge.....97
Figure IV. 42 THD du courant .....98
Figure IV. 43 Le facteur de puissance de l'onduleur .....98
Figure IV. 44 Système hybride à connexion AC .....98
Figure IV. 45 Les puissances de l'onduleur .....99
Figure IV. 46 Les puissances du réseau .....99
Figure IV. 47 La puissance photovoltaïque.....99
Figure IV. 48 Le courant photovoltaïque .....99
Figure IV. 49 La puissance éolienne.....99
Figure IV. 50 Le courant éolien.....99
Figure IV. 51 La tension continue .....100
Figure IV. 52 Le facteur de puissance .....100
Figure IV. 53 La tension CA de charge .....100
Figure IV. 55 Les harmoniques de courant .....100
Figure IV. 56 Les harmoniques de tension.....100

# Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Avantages et inconvénient de couplage DC et AC.....17
Tableau I. 2 Classification de SEH par gamme de puissance .....17
Tabeau II. 1 Le rendement et le domaine d'application de plusieurs types de cellules photovoltaïques .....22
Tabeau II. 2 Comparaison entre les différentes topologies .....25
Tabeau II. 3 La base des règles.....40
Tableau III. 1 Avantages et inconvénient de différentes éoliennes .....57
Tableau III. 2 Les règles d'appartenances.....72
Tableau IV. 1 Répertoire de l'amélioration de la vitesse du vent et de l'emplacement des éoliennes BIWT .....83
Tableau IV. 2 Puissances de sortie obtenues à partir du PV, du WEC et du système hybride (a, b), système AC .....101
Tableau IV. 3 THD de chaque système .....101

# Sommaire

Introduction Générale .....1

## CHAPITRE I : Généralité sur les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

I. 1 Introduction .....4
I. 2 La production mondiale de l'énergie .....4
I. 3 Génération d'énergie renouvelable .....6
I. 4 Génération d'électricité .....7
I. 4. 1 L'énergie hydro-électrique .....7
I. 4. 2 Energie marine .....8
I. 4. 3 Géothermie .....8
I. 4. 3 La Biomasse .....9
I. 4. 4 Photovoltaïque .....10
I. 4. 5 Production éolienne .....12
I. 5 Définition d'un système hybride .....14
I. 6 Topologies d'un système hybride .....14
I. 6. 1 Architecture à bus continu DC .....15
I. 6. 2 Architecture à bus alternatif AC .....15
I. 6. 3 Architecture parallèle (mixte) .....16
I. 6. 4 Avantages et les inconvénients de chaque système de couplage .....17
I. 7 Classification d'un système hybride .....17
I. 8 Conclusion .....18

## Chapitre II: Modélisation et simulation de la chaine de conversion photovoltaïque

II. 1 Introduction .....19
II.2 système de production de l'énergie solaire .....19
II.2.1 Le spectre de rayonnement solaire .....19
II.2 .2 L'effet photovoltaïque .....20
II. 2. 3 Différents types ce cellule photovoltaïque .....21

II. 3 Différent type de systèmes photovoltaïques .....22
II. 3. 1 Topologie de connexion du système photovoltaïque au réseau électrique.....23
II. 3. 2 Technologie des onduleurs couplée au réseau.....23
II. 3. 2. 1 Onduleur Central .....24
II. 3 .2. 2 Onduleur modulaire (module inverter) .....24
II. 3. 2. 2 Onduleur rangé (string inverter) .....25
II. 3. 2. 3 Onduleur multi-string.....25
II. 4 Modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque .....26
II. 4. 1 Modèle d'une cellule solaire .....26
II. 4. 2 Modèle mathématique.....27
II. 4. 3 Paramètres de cellule solaire .....28
II. 4. 3. 1 Courant de court circuit.....28
II. 4. 2. 2 Tension de circuit ouvert.....28
II. 4. 2. 3 Facteur de forme .....28
II. 4. 2. 4 Le Rendement.....29
II. 4. 3 Le module photovoltaïque.....29
II. 4. 3. 1 Module série .....30
II. 4. 3. 2 Module en parallèle .....30
II. 4. 3. 3 Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V), P(V) .....31
II. 4. 4 Le Générateur photovoltaïque .....32
II. 4. 5 Inclinaison et orientation des panneaux solaire .....33
II. 5 Synthèse de la commande MPPT de système photovoltaïque .....35
II. 5. 1 Technique de perturbation et d'observation (P&O).....36
II. 5. 2 Conductance incrémentale (INC) .....37
II. 5. 3 Synthèse de régulateur flou .....38
II. 6 Stratégie de contrôle de l'onduleur.....40
II. 7 Résultats de la simulation .....44
II. 9 Conclusion .....47

## Chapitre III: Modélisation et simulation de la chaine de conversion éolienne

III. 1 Introduction .....49
III. 2 Définition de l'énergie éolienne .....49
III. 3 Différents types d'aérogénérateurs.....50

III.3. 1 Les éoliennes à axe vertical .....50
III.3. 1. 1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus.....50
III. 3. 1. 2 Eolienne à axe vertical de type Savonius.....50
III. 3. 2 Les éoliennes à axe horizontal .....51
III. 4 Taille d'aérogénérateur.....51
III. 5 Architecture d'une éolienne.....52
III. 5 .3 Mât .....53
III. 6 La Conversion Electromécanique .....54
III.6.1 Les Éoliennes à vitesse fixe .....54
III.6. 2 Les éoliennes à vitesse variables.....55
III. 6. 2. 1 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) .....55
III. 6. 2. 2 Génératrice synchrone à aimant permanant (GSAP) .....56
III. 8 Les modes d'exploitation de parc éolien .....57
III. 8. 1 Les éoliennes onshore.....58
III. 8. 2 Les éoliennes offshores .....58
III. 7 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....59
III.9 Modélisation d'une chaine de conversion éolienne .....61
III.9. 1 Modélisation de la turbine .....62
III. 9. 2 Modélisation de l'arbre de la machine.....65
III. 9. 3 Modèle de la Génératrice synchrone à aiment permanent .....66
III. 9. 4 Redresseur de diode triphasé.....68
III. 9. 5 Hacheur élévateur.....70
III. 9. 6 Synthèse de la commande MPPT de système éolien.....70
III.10 La simulation d'un parc éolien .....73
III. 11 Résultats de simulations .....73
III. 12 Conclusion .....77

## Chapitre IV: Intégration des énergies renouvelables dans le bâtiment avec la simulation des différentes topologies d'hybridation

IV. 1 Introduction .....78
IV. 2 Intégration des énergies renouvelables dans les zones urbaines.....79
IV. 2 Installation des éoliennes aux bâtiments .....79
IV. 2. 1 Éoliennes montées sur bâtiment.....80

IV. 2. 1. 1 Éolienne HAWT montée sur bâtiment .....80
IV. 2. 1. 2 Éolienne VAWT montée sur bâtiment .....81
IV. 2. 2 Construction de turbines éoliennes intégrées.....81
IV. 2. 3 Construction de turbines éoliennes augmentées .....82
IV. 3 L'installation d'énergie photovoltaïque dans le bâtiment .....84
IV. 3. 1 L'intégration photovoltaïque aux bâtiments (BIPV) .....85
IV. 3. 1. 1 Produits en feuille.....85
IV. 3. 1. 2 Produits de tuiles BIPV .....86
IV. 3. 1. 3 Les produits de modules BIPV .....86
IV. 3. 1. 4 Produits de vitrage à cellules solaires.....87
IV. 3. 2 Produits BAPV .....87
IV. 4 Intégration de système hybride (solaire et éolien) dans le bâtiment (BIPVWT) .....88
VI. 5 Topologie d'hybridation des systèmes Eolien/PV connectés au réseau électrique.....89
VI.5. 1 Système hybride à bus DC.....89
IV. 5. 1. 1 Système hybride avec MPPT individuels .....90
IV. 5. 1. 2 Système hybride avec MPPT commun.....95
IV. 5. 2 Système hybride à bus AC.....98
VI. 7 Conclusion.....102
Conclusion générale.....103
Bibliographie.....105
Annexe.....114

# Introduction Générale

# Introduction Générale

La demande mondiale d'électricité augmente de plus en plus, la réserve des énergies traditionnelles (pétrole, charbon) se raréfie et le climat de la terre se dégradé par l'émission de gaz à effet de serre (réchauffement climatique). Pour toutes ces raisons, le monde est convaincu de se diriger vers l'utilisation des énergies renouvelables pour atteindre un développement durable.

Les sources d'énergies renouvelables (le soleil, le vent, les courants d'eau, biomasse..) sont disponibles, inépuisables et capables à produire l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins énergiques à long terme. Ces sources naturelles permettent d'obtenir, après transformation, de l'énergie mécanique, de l'électricité et de la chaleur réduisant les impacts environnementaux créent par les énergies fossile et fissile. Parmi celle-ci l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne sont les énergies les plus utilisées dans le monde.

L'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, sont des énergies propres, non polluantes, inépuisables et très adaptées à la production décentralisée. Mais le problème lié à ces deux sources est l'intermittente de l'énergie produite grâce la grande indépendance avec les conditions climatiques (l'ensoleillement, la température et la vitesse de vent). Généralement, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque sont des énergies complémentaires, car la journée ensoleillée est souvent calme et le vent soit fort à la journée froide ou à la nuit. Donc l'intégration de ces deux systèmes pour former un système hybride (éolienne/ photovoltaïque) est une excellente option pour la production d'une meilleure énergie avec meilleurs performances que les sources individuelles. Le système hybride peut être connecté au réseau électrique ou autonome avec un moyen de stockage pour éviter la coupure d'électricité.

Le grand pourcentage de la consommation mondiale d'électricité est dans les villes qu'elles sont responsables à une grande émission du gaz à effet de serre. En conséquence, l'intégration de l'énergie renouvelable dans les zones urbaines est très nécessaire pour satisfaire leurs besoins énergétiques évitant les impacts environnementaux. L'énergie photovoltaïque est l'énergie la plus adaptable à l'intégration dans les zones urbaines due à leur petite taille et leur opération silencieuse. Certains types des éoliennes sont encore

adaptables à cette intégration comme les turbines savonius, darrieus et les éoliennes à axe horizontal de petite taille. En résulte, le système hybride (éolien/ PV) est alors connecté au réseau électrique. L'excédent de puissance sera injecté à ce réseau qui couvrira la puissance déficiente lorsque les besoins de consommateur dépasseront la puissance fournie par le système hybride.

Notre objectif principal est de faire une étude comparative entre les systèmes à une seule source d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne) avec trois topologies d'hybridation de ces deux sources; système hybride à bus DC avec MPPT individuels, système à bus DC contrôlé par un MPPT commun et le système hybride à bus AC pour bien comprendre le rôle de l'hybridation à donner une énergie plus fiable, la meilleur topologie de combinaison et les meilleurs performances.

Pour atteindre notre objectif, la thèse est organisée en quatre chapitres ;

Dans le premier chapitre, on présente un état descriptif sur les différents types de l'énergie renouvelables et leurs portions à la production mondiale d'électricité. Ensuite, les différentes architectures de système hybride sont présentées.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, en allant des définitions, principe de fonctionnement et les topologies usuelles à la connexion au réseau électrique. Afin de faire la simulation, la modélisation des différents éléments dans la chaine de conversion photovoltaïque (générateur PV, hacheur et onduleur) sont détaillés avec les différents contrôles utilisés ; la logique floue pour le poursuivre de point de puissance maximale et la commande vectorielle pour le contrôle des puissances injectées au réseau électrique. Les résultats de simulation sous MATLAB/ simulink sont présentés pour prouver l'efficacité de notre commande appliquée.

Le deuxième chapitre détaille le système de conversion éolienne à la base d'une machine synchrone à aiment permanant. Tout d'abord, on représente les types existants d'aérogénérateur, les composants essentiels d'une éolienne et la constitution d'un parc éolienne terrestre et marine pour augmenter la puissance produite. La simulation d'un parc éolien terrestre de six turbines est présentée après la modélisation des différents composants et l'étude de la commande MPPT par la logique floue et encore le système d'orientation des pales (pitch angle control). La connexion au réseau électrique se fait à l'intermédiaire d'un onduleur contrôlé par la commande vectorielle (la même façon avec le système photovoltaïque).

Dans le troisième chapitre, on parle de l'intégration des énergies photovoltaïque et éolienne dans les sites urbains pour garantir leurs satisfactions énergétiques. Les différentes topologies de combinaison de ces deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne) ; système hybride à un bus DC avec des MPPT individuels, ce système est connecté au même onduleur à travers deux hacheurs différents pour appliquer à chaque système un MPPT personnel. Système hybride à un bus DC avec un MPPT commun, les deux sources d'énergie renouvelable sont connectées à un seul onduleur à l'intermédiaire d'un hacheur commun qui applique un seul control MPPT pour les deux sous-systèmes. Le troisième système est un bus AC, chaque source a un hacheur et un onduleur individuel, qu'ils sont connectés au réseau électriques par une connexion alternative. Ensuite, une étude comparative entre ces trois topologies avec les systèmes à une seule source d'énergie renouvelable est établie pour bien distinguer l'avantage de l'hybridation à fournir une puissance plus fiable et la meilleure architecture de combinaison à donner les meilleures performances.

*Chapitre I*

# Généralité sur les Energies Renouvelables et les Systèmes Hybrides

## I. 1 Introduction

A l'heure actuelle, la demande croissante d'énergie, l'épuisement des énergies traditionnelles el le changement climatique sont les principaux problèmes auxquels notre monde est confronté. Pour faire face à ces problèmes, l'utilisation des énergies renouvelables est proposée et développée. Ces énergies sont des énergies propres, disponibles, inépuisables et capables à satisfaire nos besoins énergiques à long terme. Mais, les énergies renouvelables sont intermittentes et dépendent profondément aux conditions climatiques. Pour surmonter cette dépendance, l'hybridation de plusieurs sources est proposée pour améliorer la rentabilité de l'énergie générée.

Dans ce chapitre, nous exposerons les différents types d'énergies renouvelables avec leurs avantages et inconvénients, puis nous définirons les différents types de système hybride.

## I. 2 La production mondiale de l'énergie

Avant quelques années, la production mondiale d'électricité est de base des matières fossiles uniquement (Le pétrole, le charbon et le gaz naturel). L'utilisation des ces ressources traditionnelles mis le monde en danger par l'émission de gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible. Les marchés des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années [1].

En 2020, la consommation mondiale d'électricité est à la base des énergies fossiles 79.1% (84.3% en 2019), des énergies renouvelables (12.6%, contre 11.4% en 2019) et nucléaire (4.3%). La production mondiale des énergies renouvelables augmente de 26.9% en 2020 à 28.6% en 2019.

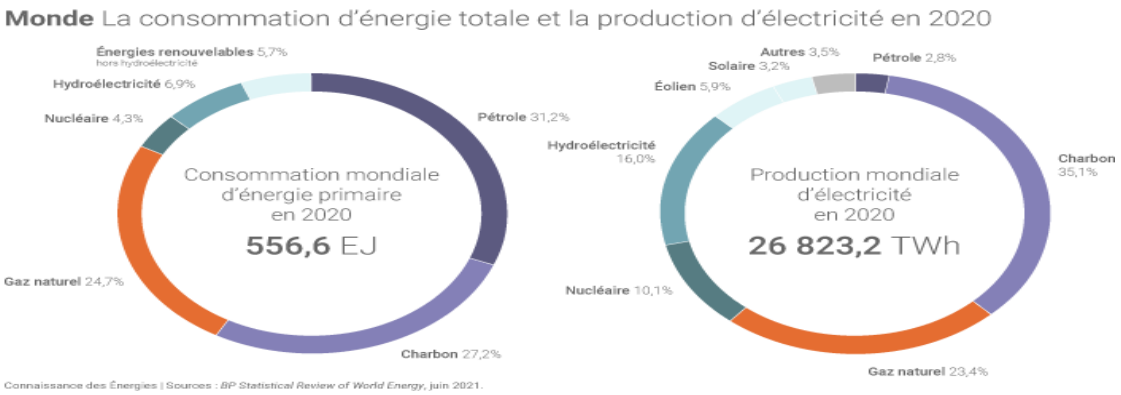



Figure I. 1 Production et consommation mondiale d'électricité en 2020 [2]

Après une hausse de 1,3 % en 2019, la consommation mondiale d'énergie primaire a diminué de 4,5 % en 2020. Cette baisse a eu un effet positif sur les émissions de CO2, qu'elles ont même diminué de 6 %.

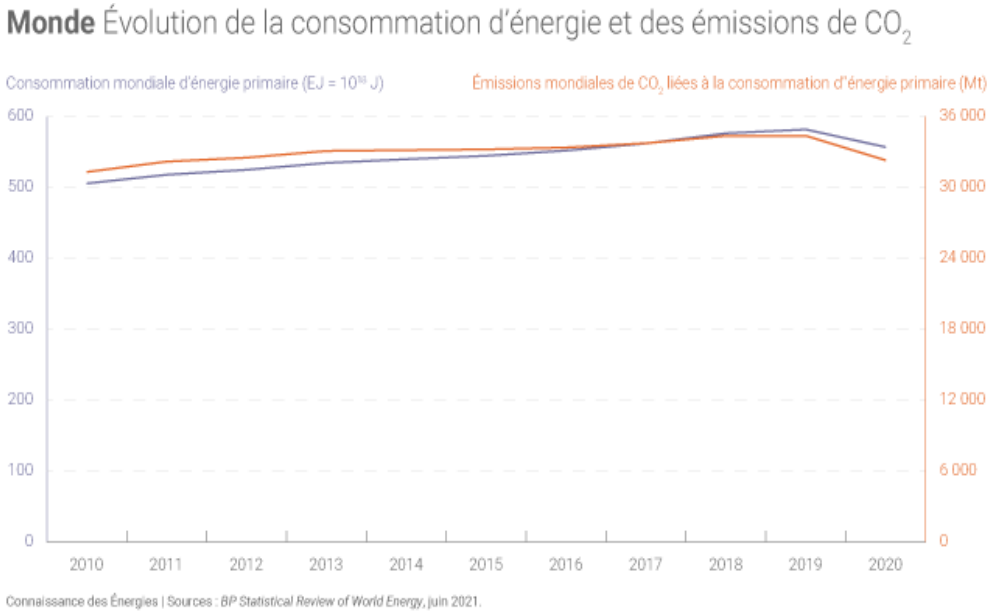



Figure I. 2 Evaluation mondiale de la consommation d'énergie et des émissions de CO2 [2]

Une augmentation progressive des capacités renouvelables est enregistrée ces dernières années. Plus de 280 GW des installations électriques de capacité renouvelable sont envisagés en 2022 contre une installation de 270 GW en 2021.

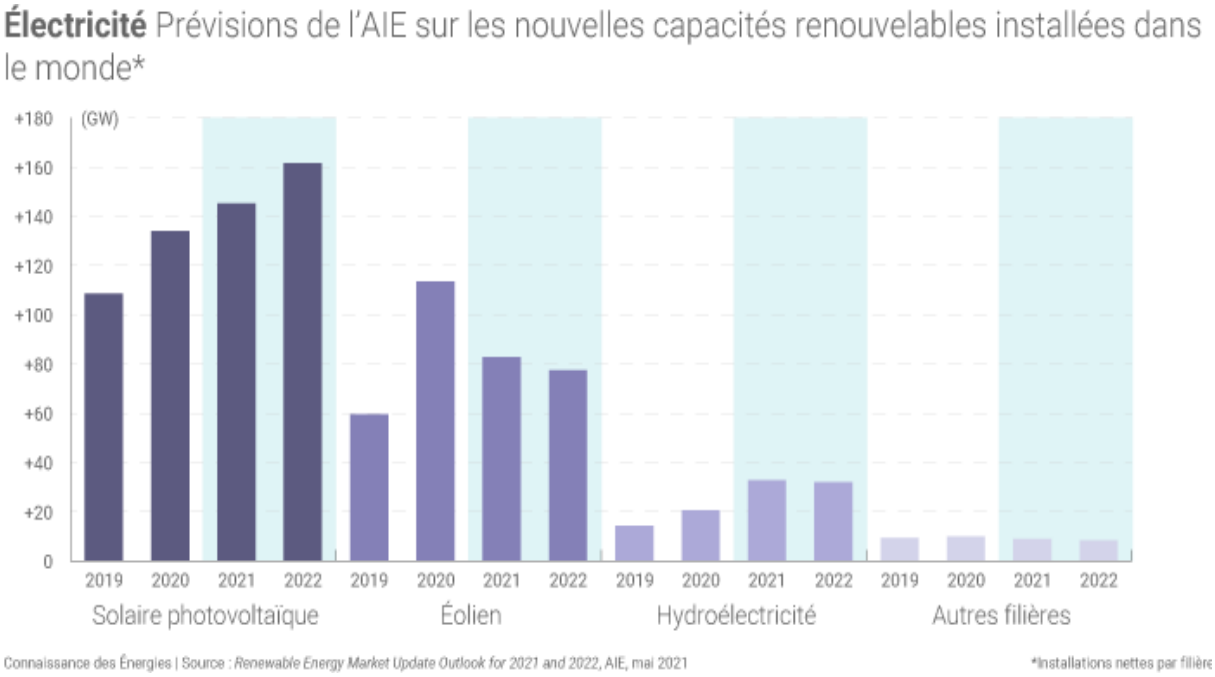



Figure I. 3 Les nouvelles capacités renouvelables installées dans le monde [2]

## I. 3 Génération d'énergie renouvelable

Une ressource est dite non renouvelable lorsque sa réservation diminue par sa consommation à l'échelle de temps humain. On peut classer les énergies non renouvelables en deux grandes familles :

1. Énergie fossile (le charbon, le gaz naturel et le pétrole): La consommation intensive, provoque l'épuisement de son réservoir. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine.

2. Énergie nucléaire, les gisements d'uranium étant limités, et son stock ne se reconstitue pas. Seule la fusion nucléaire pourrait, à condition d'être industriellement maîtrisée, produire de l'énergie sur le très long terme [3].

Il a été prouvé que la consommation massive de ces types d'énergies a un effet néfaste sur la planète (le réchauffement climatique) [4]. C'est ce qui a poussé le monde à se diriger vers l'utilisation des énergies renouvelables.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie inépuisable qui se renouvelle régulièrement et rapidement avec le temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers provoqués principalement par ; le Soleil (rayonnement), la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) comme il est illustré dans la figure suivante.

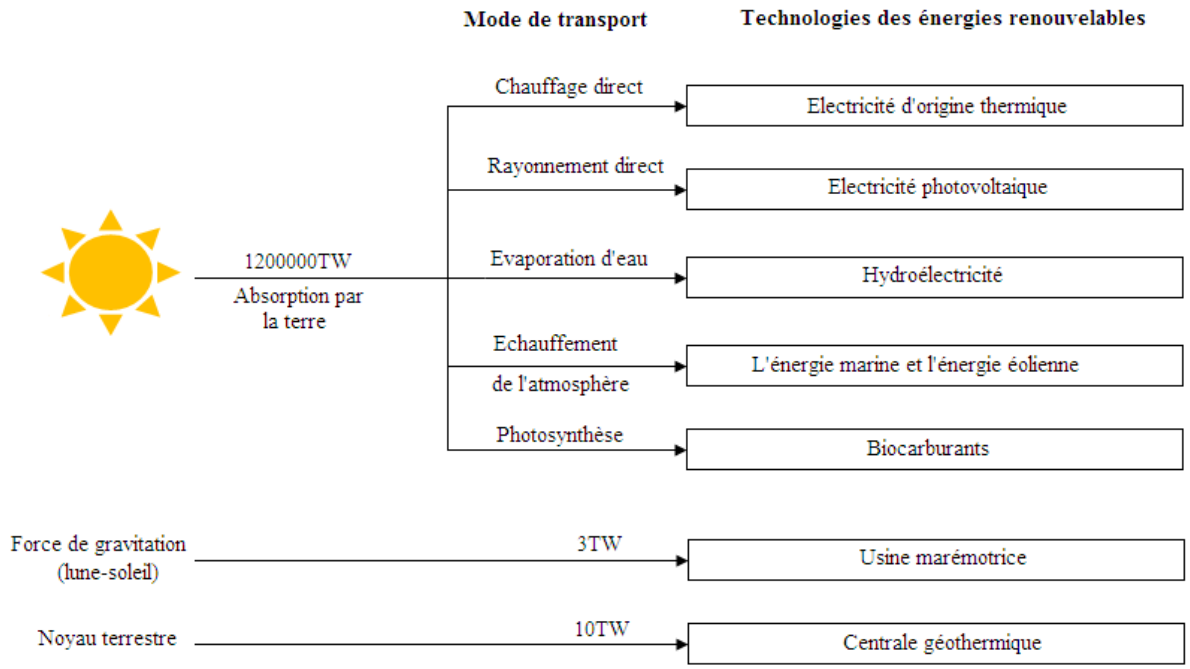



Figure I. 4 L'origine des énergies renouvelables

## I. 4 Génération d'électricité

Actuellement, les énergies renouvelables les plus utilisées à la production d'électricité sont l'hydraulique, le solaire photovoltaïque et l'éolienne. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et utilisée directement ou bien injectée au réseau électrique.

### I. 4. 1 L'énergie hydro-électrique

L'énergie hydro-électrique est la production d'électricité à partir de la force d'eau produite à partir de barrages situés sur des rivières, fleuves ou lac artificiels et équipés de turbine entrainant un générateur [5]. Il est important de notre qu'il est plus facile de prévoir à l'avance les débits de courant d'eau que les vents car on installe en général un bassin de retenue qui permit d'avoir un débit régulier [6].

Cette énergie ne dégage aucun déchet, aucun $CO_2$ et elle est considérée stable contrairement à l'énergie solaire ou éolienne. L'hydroélectricité est classée la première dans les énergies renouvelables, fournissant 16% d'électricité mondiale en 2020.

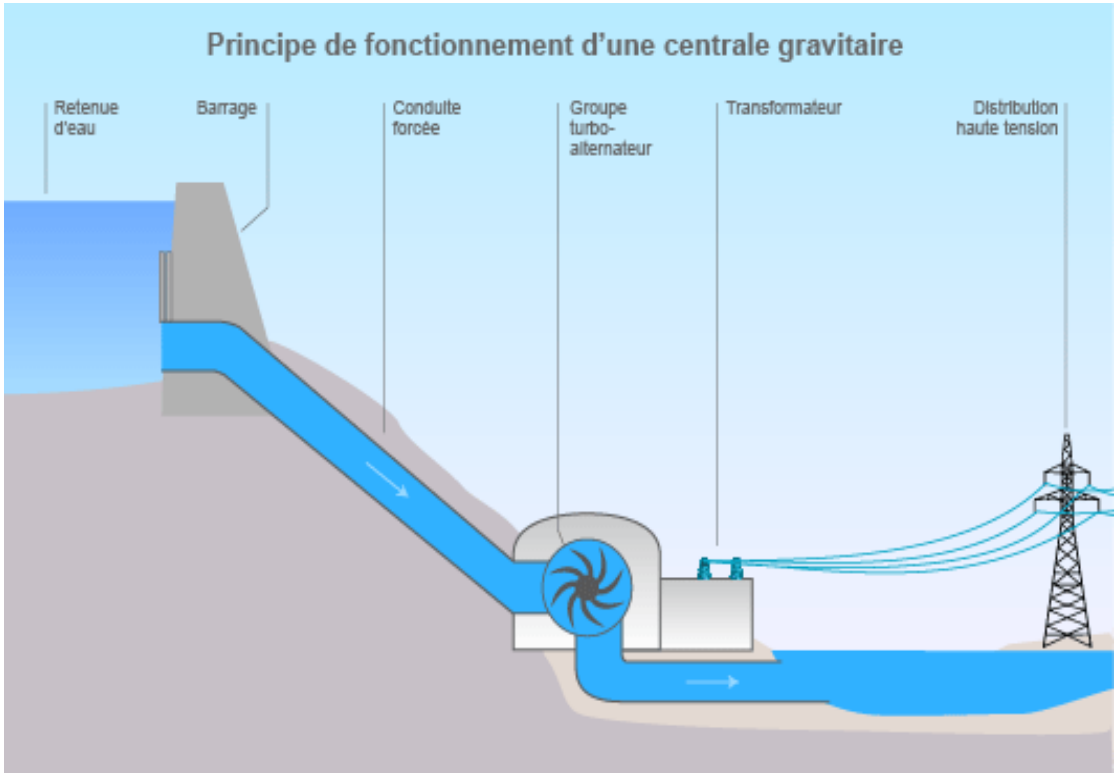



Figure I. 5 L'énergie hydraulique

### I. 4. 2 Energie marine

L'eau, est en perpétuelle circulation. Ce mouvement fait tourner des turbines qui entrainent des générateurs électriques pour produire de l'électricité. Cette énergie est produite à partir des courants marins, des vagues, de la marée ou du gradient de température entre surface et profondeurs de la mer. Mais cette énergie coûte cher à produire.

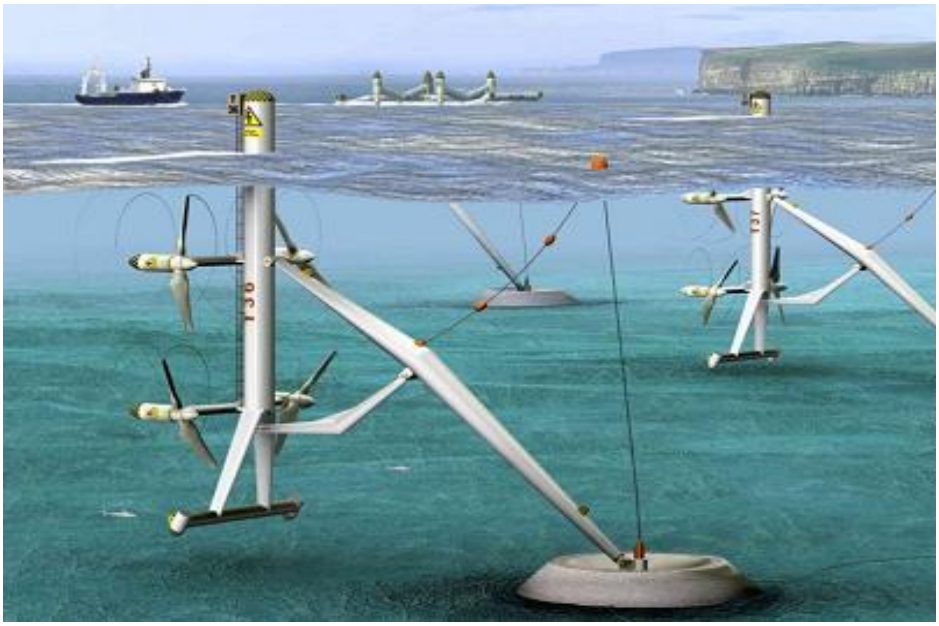


Figure I. 6 L'énergie marine

### I. 4. 3 Géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol par l'utilisation des centrales géothermiques qui peuvent utiliser cette chaleur en la convertissant en électricité ou en fournissant les systèmes de chauffage urbain.

Sachant que la température croît depuis la surface vers le centre de la terre en moyenne de 1°C tous les 30 mètre de profondeur, on caractérise 3 types d'énergie :

- La géothermie à haute énergie : la température élevée du gisement (entre80°C et 300°C) permettant la production d'électricité.
- La géothermie à basse énergie : La température de l'eau entre 30°C et 100°C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.
- La géothermie à très basse énergie : la température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique

La géothermie est une énergie fiable et disponible dans le temps mais la construction de centrales géothermique peut affecter des tremblements de la terre qui devient significatif pour les forages de 1500 mètre et plus.

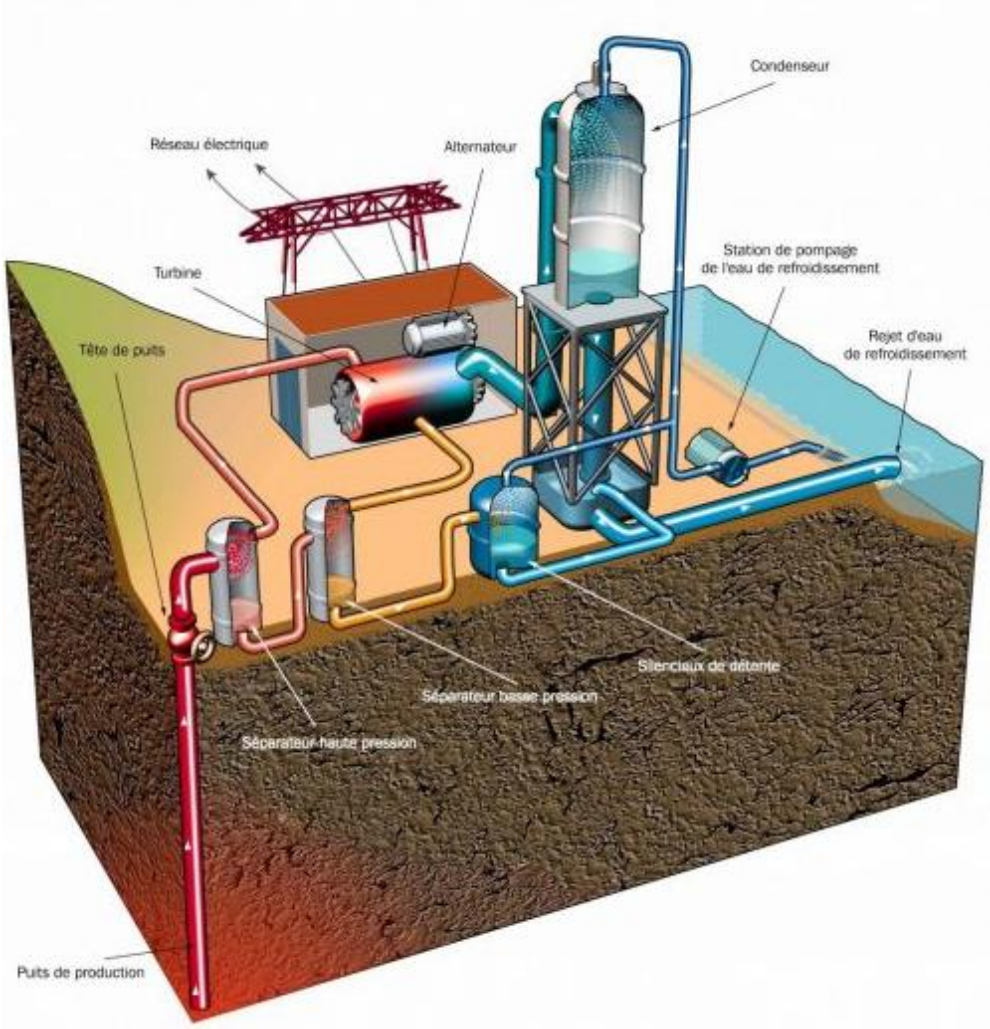



Figure I. 7 La géothermie

### I. 4. 3 La Biomasse

La biomasse peut être brûlée pour produire de la chaleur qui est utilisée pour créer de la vapeur afin de faire tourner des turbines pour produire de l'électricité [7]. La chaleur est utilisée pour le chauffage d'eau à l'aide d'un échangeur. La vapeur fait tourner une turbine relié à un générateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La production de l'électricité par la biomasse a un excellent rendement énergétique, mais son installation doit être proche au lieu de consommation en raison des pertes pendant le transport de chaleur. Mais cette combustion est frottement émettrice de $CO_2$. Son utilisation peut dans certains cas engendrer des déséquilibres environnementaux.

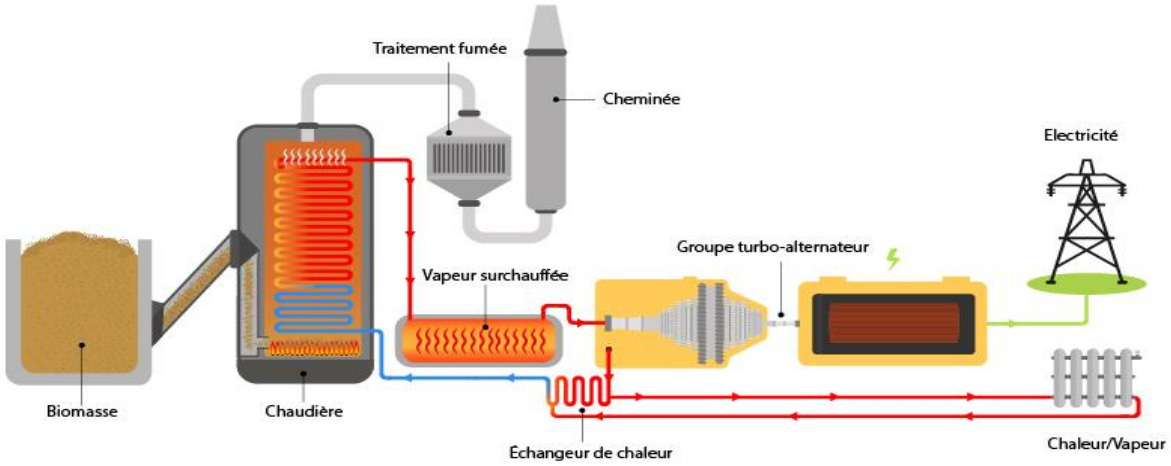



Figure I. 8 Diagrammes de la fabrication de l'énergie biomasse

### I. 4. 4 Photovoltaïque

Une autre technologie d'énergie renouvelable qui s'impose comme un moyen de maintenir et d'améliorer le niveau de vie sans nuire à l'environnement est la technologie photovoltaïque (PV) [8].

Figure I. 9 L'énergie photovoltaïque

Le soleil est une source d'énergie quasiment inépuisable qui envoie à la surface de la terre un rayonnement dont l'énergie représente entre 7000 et 8000 fois la consommation annuelle d'énergie dans le monde [9]. L'utilisation des systèmes photovoltaïques permet d'exploiter cette source inépuisable pour produire de l'électricité suffisante à couvrir la demande mondiale croissante. Les systèmes photovoltaïques utilisent des cellules pour convertir ce rayonnement solaire en électricité. La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de matériau semi-conducteur comme le silicium qui a la capacité de transformer

les photons en électrons. Cela crée une différence de potentiel entre les deux couches qui dépend de l'intensité de l'ensoleillement.

La conception des systèmes photovoltaïque nécessite la connaissance du potentiel solaire dans la zone d'installation. La répartition du rayonnement solaire dans le monde est donnée sur la figure (I. 10)

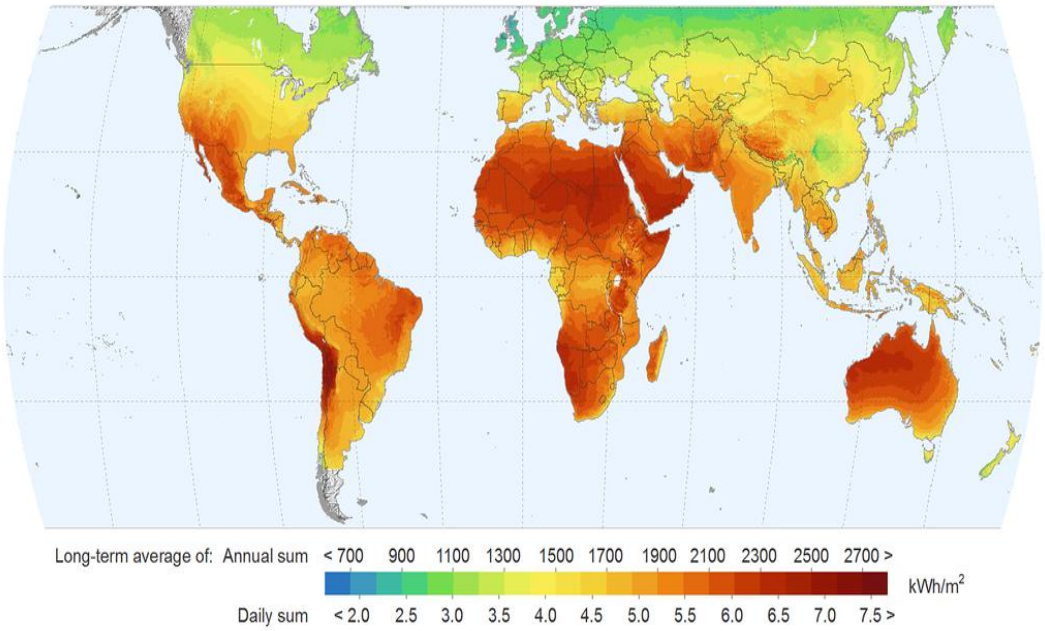



Figure I. 10 Rayonnement solaire dans le monde (annuelle et journalière moyenne) [10]

En raison de sa situation privilégiée et de sa grande superficie, l'Algérie possède le plus grand champ d'énergie solaire du bassin méditerranéen. Le pays bénéficie d'environ 3000 heures d'ensoleillement par an, ce qui lui confère le plus grand champ solaire au monde et la plus grande capacité du bassin méditerranéen [11].

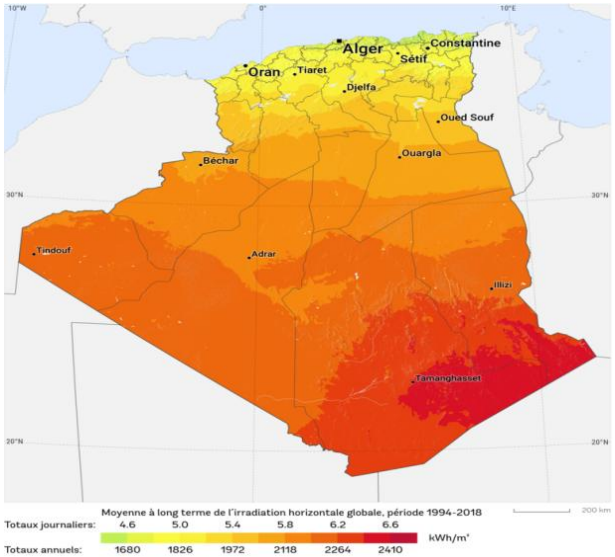



Figure I. 11 La carte d'irradiation en Algérie [10]

**Les avantages et les inconvenants**

Les avantages

- Une énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique.
- Exploitable en montage dans les sites urbains que dans les villages isolés.
- Simple et facile à installer avec une grande durée de vie.
- Ils nécessitent très peu de surveillance et entretien.
- ils peuvent être des systèmes autonomes ou combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

Les inconvenants

- Le faible rendement des cellules solaire qui est entre 10% et 23%.
- La perturbation énergétique due à la variation des conditions climatique (l'ensoleillement et la température).
- la fabrication et l'installation des panneaux est très cher.

### I. 4. 5 Production éolienne

L'énergie éolienne est l'une des principales sources d'énergie renouvelable qui connaît la croissance la plus rapide [12]. La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui sont en perpétuel déplacement. Depuis l'antiquité, cette énergie a été exploitée pour moudre les grains, pompage d'eau …etc. Après le choc pétrolier, cette énergie a connu un très grand développement et investissement mondial avec une croissance de 30% par an.

Figure I. 12 L'énergie éolienne

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière [13].

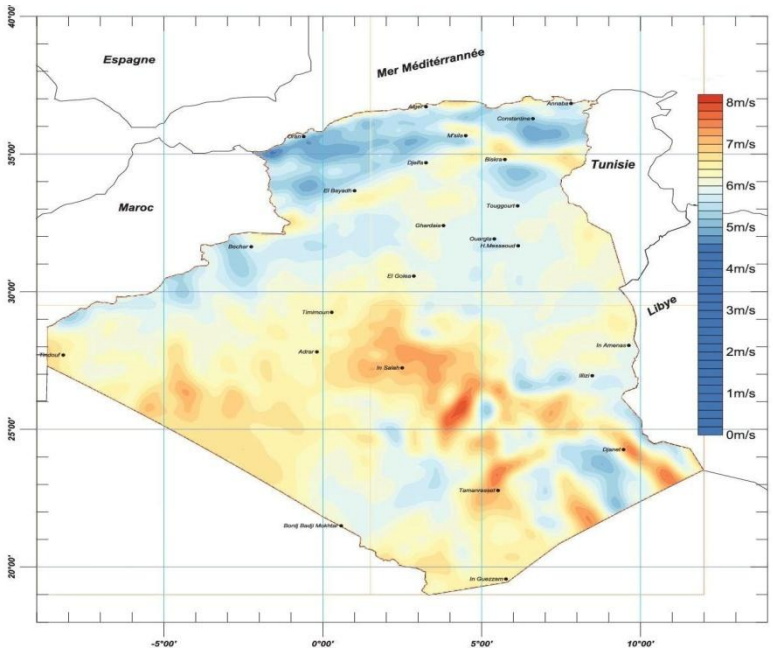



Figure I. 13 Carte du vent en Algérie [14]

**Les avantages et les inconvenants**

Avantages

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie :

- une énergie durable et renouvelable qui respecte l'environnement.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- Possibilité d'intégration dans les zones urbaines ou dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- la relative simplicité des technologies mises en œuvre.

Inconvenants

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- Le bruit diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs [15].
- Des interférences d'ondes.
- la puissance produite n'est pas constante due aux variations de vent.

## I. 5 Définition d'un système hybride

Un système hybride à sources d'énergies renouvelables (SEH) combine plusieurs sources d'énergie pour produire de l'électricité, en utilisant au moins une source renouvelable. 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 [16]. Cela permit de produire une énergie plus fiable que les systèmes à une seule d'énergie renouvelable.

## I. 6 Topologies d'un système hybride

Selon le mode de fonctionnement, Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes ; Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides connectés au réseau électrique (travaillant en parallèle avec le réseau électrique). Le deuxième groupe est les systèmes hybrides autonomes qui sont utilisés généralement dans les sites isolés (les montagnes, iles, pompage d'eau…)

Selon la structure de système hybride, on a trois critères, le premier est la présence ou non d'une source d'énergie traditionnel (générateur diesel, micro turbine à gaz….). La deuxième est l'utilisation d'un système de stockage ou non (batterie, super condensateur, électrolyseurs…) qui assure l'électrification en cas d'absence des ressources primaire. Le dernier critère est le type des énergies renouvelables utilisées (photovoltaïque, éolien, convertisseur d'énergie hydraulique…), le choix de ces sources dépend du potentiel énergétique présent, l'endroit d'installation, la charge alimenté….la classification générale est illustrée sur la Figure I.14.

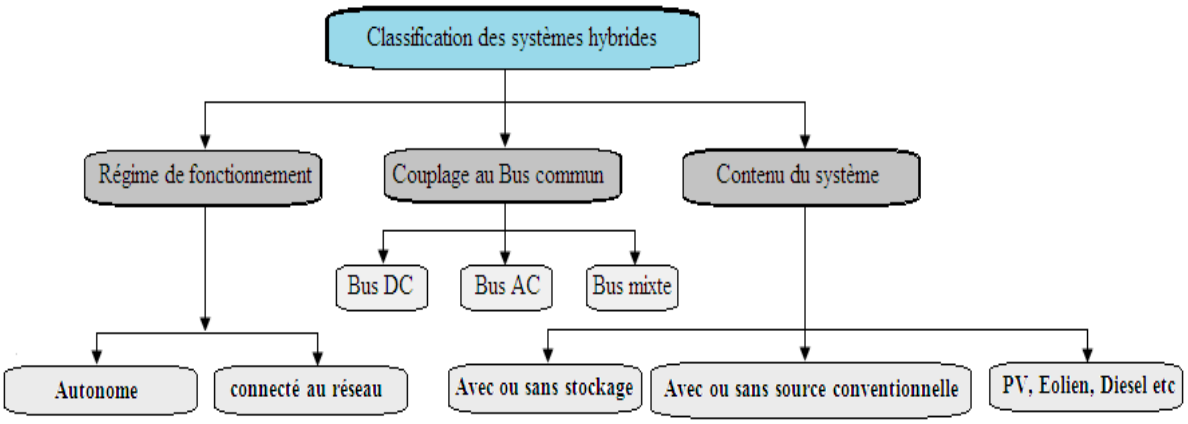



Figure I. 14 Classification des systèmes hybrides

Dans un système hybride, les sources d'énergie peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu (DC) et architecture à bus alternatif (AC).

### I. 6. 1 Architecture à bus continu DC

Dans l'architecteur à bus continu, toutes les sources sont connectées à un bus continu commun comme il est montré dans la figure (I. 12). En effet, les sources à courant alternative utilisent des redresseurs qui convertirent l'alternatif au continu. Les sources à courant continu comme le système photovoltaïque peut être connectées directement ou à travers des convertisseurs DC/DC. A partir ce bus continu, les sources sont connectées au réseau électrique ou à la charge via un onduleur électrique. Cette architecture est la plus simple à réaliser avec un rendement très élevé par rapport aux autres architectures du couplage.

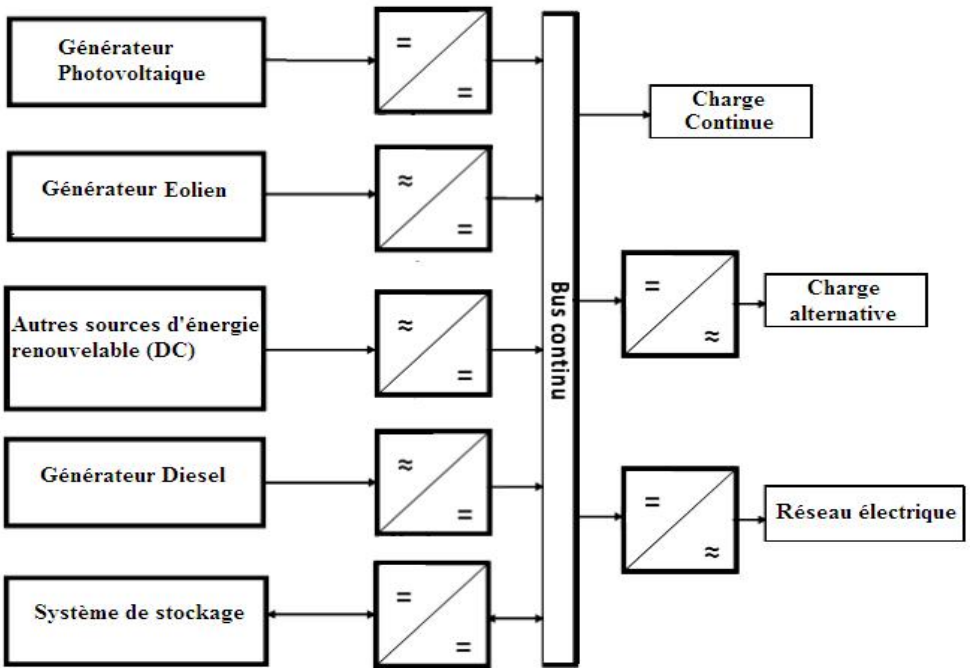



Figure I. 15 Système hybride à bus continu (DC)

### I. 6. 2 Architecture à bus alternatif AC

La figure (I. 16) représente la topologie d'un système hybride à bus alternatif où toutes les sources sont connectées à un bus AC commun. Cette architecture permet de relier directement les sources au réseau électrique ou à la charge alternative. Mais, la réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [17].

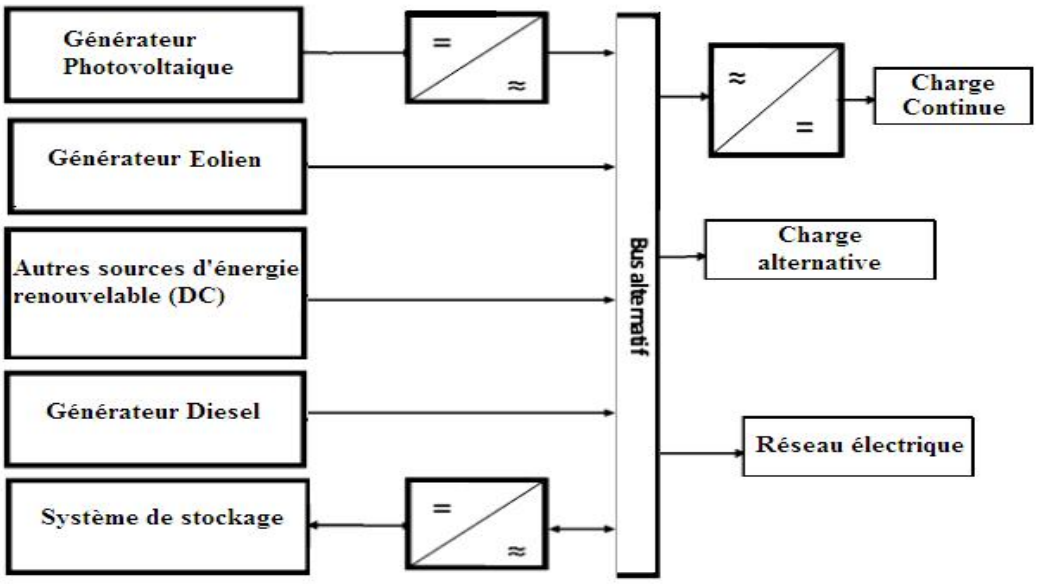



Figure I. 16 Système hybride à bus alternatif (AC)

### I. 6. 3 Architecture parallèle (mixte)

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus DC qui relie les sources à courant continu, et un bus AC sur lequel les sources alternatifs sont connectées. Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel.

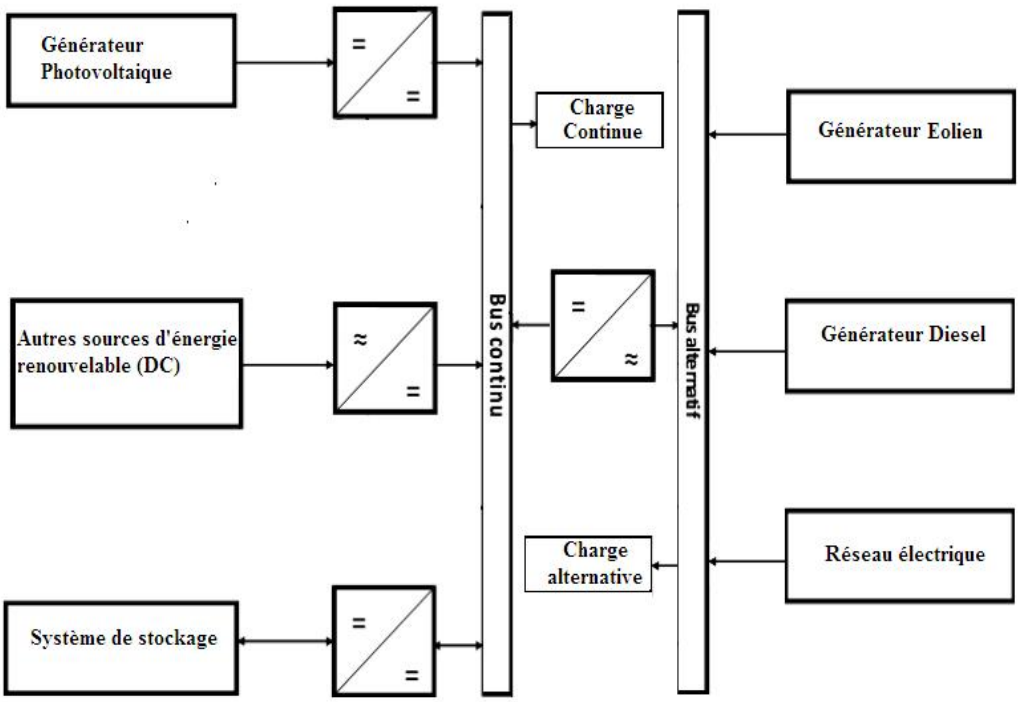



Figure I. 17 Système hybride à deux bus (DC, AC)

### I. 6. 4 Avantages et les inconvénients de chaque système de couplage

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de chaque couplage DC et AC.

Tableau I. 1 Avantages et inconvénient de couplage DC et AC [18]

| Couplage du bus | avantages | inconvénients |
|---|---|---|
| DC | - Synchronisme n'est pas nécessaire.<br>- Moins de pertes de transmission<br>- Connexion à un seul câble | - Des problèmes de compatibilité de tension<br>- Problèmes de conversion avec les électrodes DC.<br>- Connexion non standard nécessite des couts élevés dans l'installation et la maintenance |
| AC | - Il peut être facilement isolé du système en cas où des sources tombent en panne<br>- Connexion au réseau facile<br>- Interface standard et la structure modulaire.<br>- Multi-source facile<br>- Bien d'établir dans le coté économique. | - Synchronisme nécessaire.<br>- Le facteur de puissance et le facteur des harmoniques de distorsion sont nécessaires.<br>- Les pertes de transmission sont plus élevées (spécialement pour les longues distances) |

## I. 7 Classification d'un système hybride

A partir de la puissance produite d'un système hybride, on peut le classer en trois catégories comme il est illustré dans le tableau suivant ;

Tableau I. 2 Classification de SEH par gamme de puissance [19]

| Puissance du SEH[kW] | Application |
|---|---|
| Faible: <5 | Système autonomies; stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autre applications isolées |
| Moyenne :10-250 | Micro réseau isolés; alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales |
| Grande: >500 | Grandes réseau isolés ( ex; réseau insulaires) |

## I. 8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur les énergies renouvelables qui' elles ont mis en place pour couvrir la demande mondiale d'électricité et pour faire face aux problèmes lient aux sources d'énergies traditionnelles. Ces énergies ont une grande dépendance avec les conditions métalogiques (vitesse de vent, ensoleillement et température, courant de marine…) qui influencent sur la stabilité de l'énergie produite. Par conséquence, l'hybridation de plusieurs sources est proposée pour satisfaire une puissance stable aux consommateurs.

# *Chapitre II*

## Modélisation et Simulation du Système Photovoltaïque

# II. 1 Introduction

Dans le soleil, une réaction auto-régulière se fait par la transformation de l'hydrogène en hélium dégageant une énorme énergie dans l'atmosphère. Cette énergie est plus supérieure à nos besoins énergétiques qui doit être exploitée pour garantir un futur plus convenable et un monde plus sécurisé sans besoin de l'énergie conventionnel qui se raréfient plus de plus**.** Au cours de la dernière décennie, les centrales photovoltaïques connectées au réseau ont suscité une attention accrue en raison de leur compatibilité avec le réseau électrique et de leur utilisation efficace dans les zones résidentielles et industrielles [20]. On peut trouver des centrales PV terrestres ou offshore flottant à la surface de la mer [21]. De plus, l'énergie solaire présente de nombreux autres avantages, tels que son caractère non polluant, sa facilité d'installation dans n'importe quel endroit, son absence de bruit et son faible niveau d'entretien.

Dans ce chapitre, on étudie le système de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique avec la modélisation de différents composants et l'application des contrôles nécessaires pour donner une puissance plus compatible et fiable à l'injection au réseau et à la charge électrique. Afin de présenter les résultats de simulation pour prouver l'efficacité des commandes appliquées.

# II.2 système de production de l'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques.

## II.2.1 Le spectre de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons portant chacun une énergie E qui est directement liée à la longueur d'onde $\lambda$. Cette énergie est donnée par la formule suivante [22]:

$$E_{ph} = h\frac{c}{\lambda_{ond}} \qquad \text{(II.1)}$$

$h = 6.62 * {}^{2}10^{-34} Js^{-1}$ est la constante de Planck.

$c = 3 * 10^{8} ms^{-1}$ est la célérité de la lumière

$\lambda_{ond}$ est la longueur d'onde

L'énergie solaire est produite par le soleil. Le soleil forme son énergie par des réactions thermonucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. Ce processus crée un rayonnement électromagnétique et de la chaleur. Le rayonnement électromagnétique (y compris la lumière infrarouge, la lumière visible et le rayonnement ultraviolet) se répand dans l'espace dans toutes les directions [23].

D'après l'équation (II. 1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise :

La gamme spectrale du rayonnement solaire est très large et couvre les rayons ultraviolets (UV) dont la longueur d'onde (<400nm) et représente 6% du spectre du rayonnement, infrarouge (IR)(>700nm) pour 46% , y compris le visible(400<<700nm) pour 48% [24].

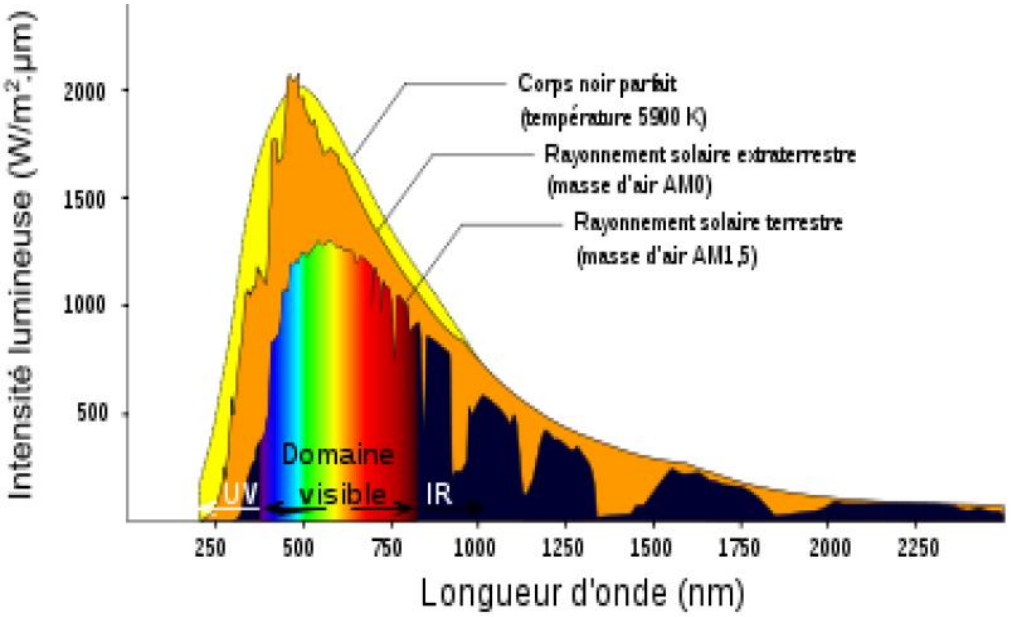



Figure II. 1 Le spectre du rayonnement solaire

## II.2 .2 L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse des photons en énergie électrique grâce à la propriété des matériaux qui la constituent d'absorber la lumière. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur [22]. L'une présentant un excès d'électrons (couche N) et l'autre un déficit en électrons (couche P). L'énergie des photons lumineux captée par les électrons dans la couche N, leur permet de se diffuser dans la couche P. Alors, la couche N devient chargée positivement, et la couche P chargée

négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui force les électrons à se repousser dans la couche N et les trous vers la couche P (jonction PN). De chaque côté du semi-conducteur se trouve une trame métallique qui recueille le courant produit et assure sa conduction vers les câbles de sortie de panneau.

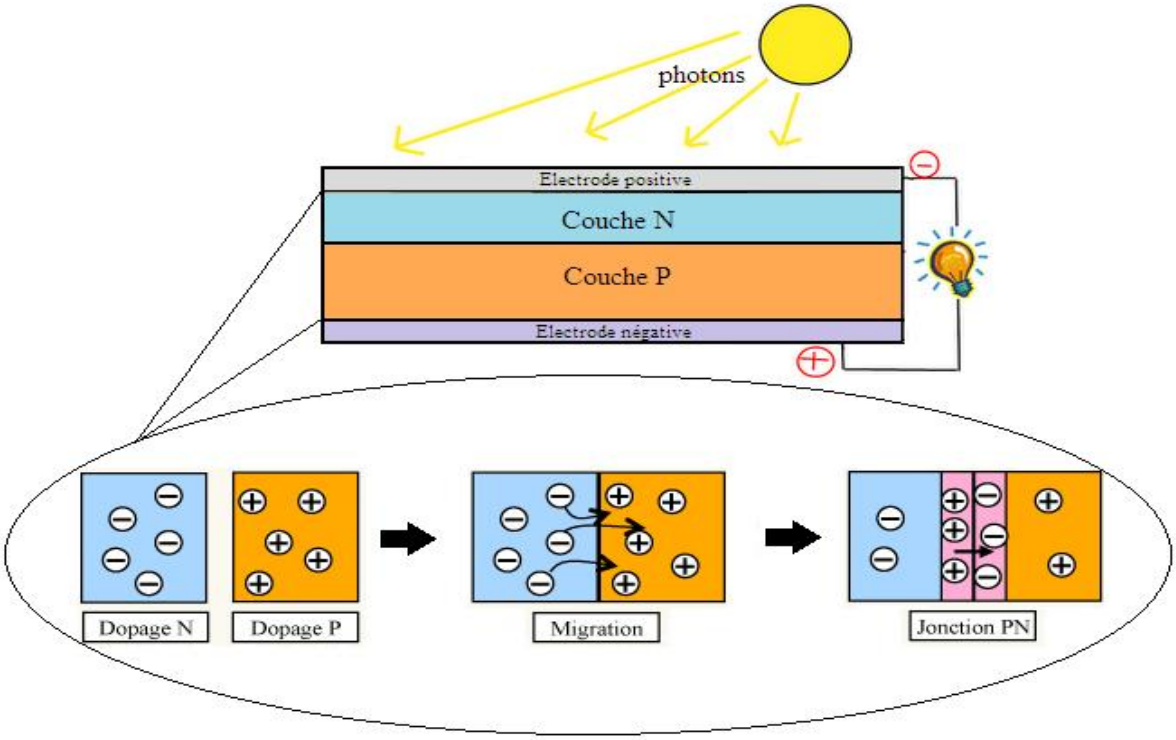



Figure II. 2 L'effet photovoltaïque

### II. 2. 3 Différents types ce cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs (silicium, sélénium, sulfure de cadmium, germanium…). Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère [25]. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature (pierre de silice).

Le tableau ci-dessous illustre le rendement et le domaine d'application de plusieurs types de cellules photovoltaïques.

Tableau II. 1 Le rendement et le domaine d'application de plusieurs types de cellules photovoltaïques [26]

| Type de cellule | Rendement de la cellule | | | Domaines d'applications |
|---|---|---|---|---|
| | théorique | en laboratoire | disponible | |
| Silicium monocristallin | 27,0% | 24,7% | 14,0-16,0% | Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites) |
| Silicium poly cristallin | 27,0% | 19,8% | 12,0-14,0% | Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés au réseau ou sites isolés) |
| Silicium amorphe | 25,0% | 13,0% | 6,0- 8,0% | Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice, montre..) module de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) |
| GaAs<br>CIGS | 29.0%<br>27.5% | 27.5%<br>18.2% | 18.0-20,0%<br>10,0-12,0% | Systèmes de concentrateur, espace (satellites).<br>Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment) |

## II. 3 Différent type de systèmes photovoltaïques

Pour l'application de système photovoltaïque, plusieurs configurations existent dans le monde :

 Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Ce système injecte la puissance produite par le générateur solaire au réseau électrique à travers des convertisseurs électriques. Cette intégration peut se faire au niveau des lignes de distribution (réseau basse tension) [27]. Les consommateurs standards de puissance sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC-AC) [28].

 Les systèmes photovoltaïques autonome, sont employés lorsque le coût de connexion au réseau est prohibitif comme les sites isolés, les îles…Mais ce système a besoin d'un système de stockage pour la continuité de l'énergie lorsque il n'a y pas assez de soleil pour produire l'énergie nécessaire.

 Les systèmes photovoltaïques hybrides où les sources de production photovoltaïques sont associées à autre sources comme les éoliennes, les générateurs diesel, la pile à combustible… ou à des moyens de stockage (batteries, super-condensateur …).

### II. 3. 1 Topologie de connexion du système photovoltaïque au réseau électrique

L'utilisation de convertisseurs électriques dans le système photovoltaïque connecté au réseau électrique joue un rôle très important dans le contrôle du point de puissance maximale qui varie en fonction de l'ensoleillement et de la température, et encore dans l'amélioration de la qualité de l'énergie produite. En plus de répondre aux exigences du fonctionnement en réseau [29]. Par conséquent, les convertisseurs de puissance modernes sont très efficaces, puisque leur rendement dépasse 95 % [30]. Pour la connexion de système photovoltaïque au réseau électrique, plusieurs topologies sont proposées afin de fournir une grande puissance comme il est détaillé dans la figure suivante :

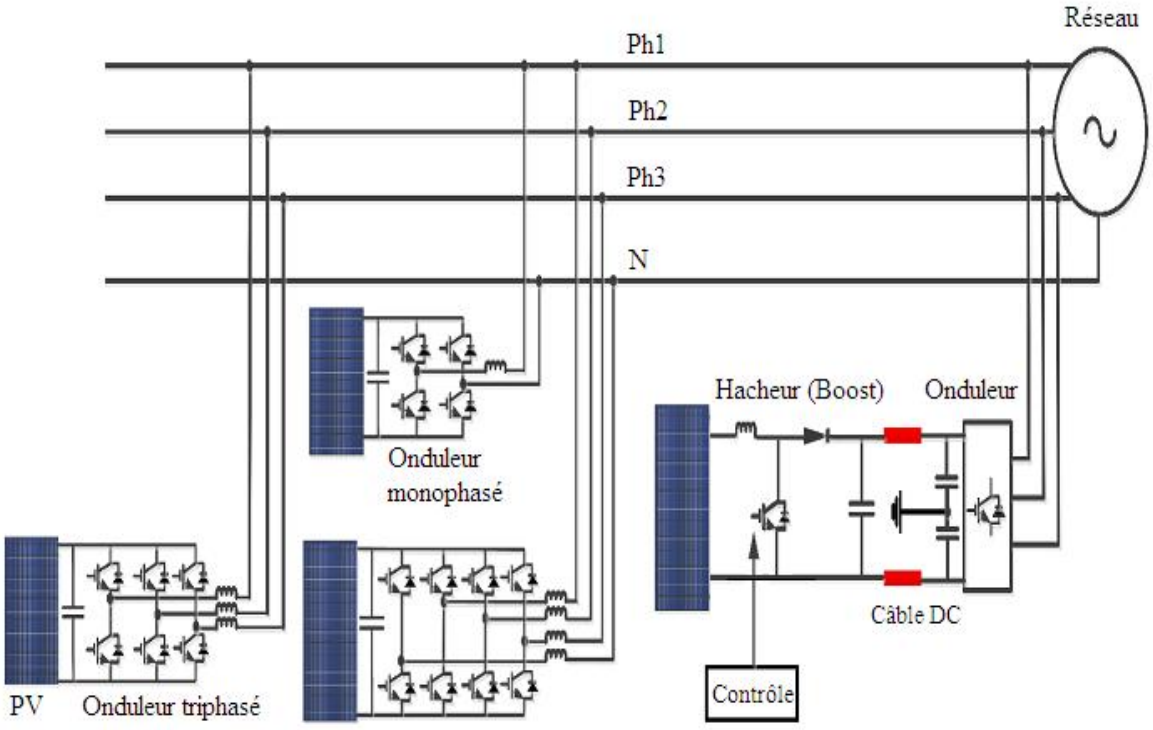



Figure II. 3 Topologies de système photovoltaïque

## II. 3. 2 Technologie des onduleurs couplée au réseau

L'onduleur est un élément très important dans le système photovoltaïque qui transforme le courant continu en courant alternatif adaptable à la consommation directe ou a l'intégration au réseau électrique. Il permet aussi d'appliquer les différentes commandes pour bien contrôler l'énergie électrique injectée au réseau électrique pour qu'elle ne dégrade pas le fonctionnement de notre système à cause de la variation des conditions climatiques (température, ensoleillement). L'efficacité et la fiabilité de cet organe électrique s'influence

beaucoup sur la chaine photovoltaïque et à son efficacité globale. La figure II.4 présente les différentes configurations des onduleurs PV connecté au réseau électrique dont il existe plusieurs types ; onduleur central, onduleur modulaire, onduleur rangé et multi string.

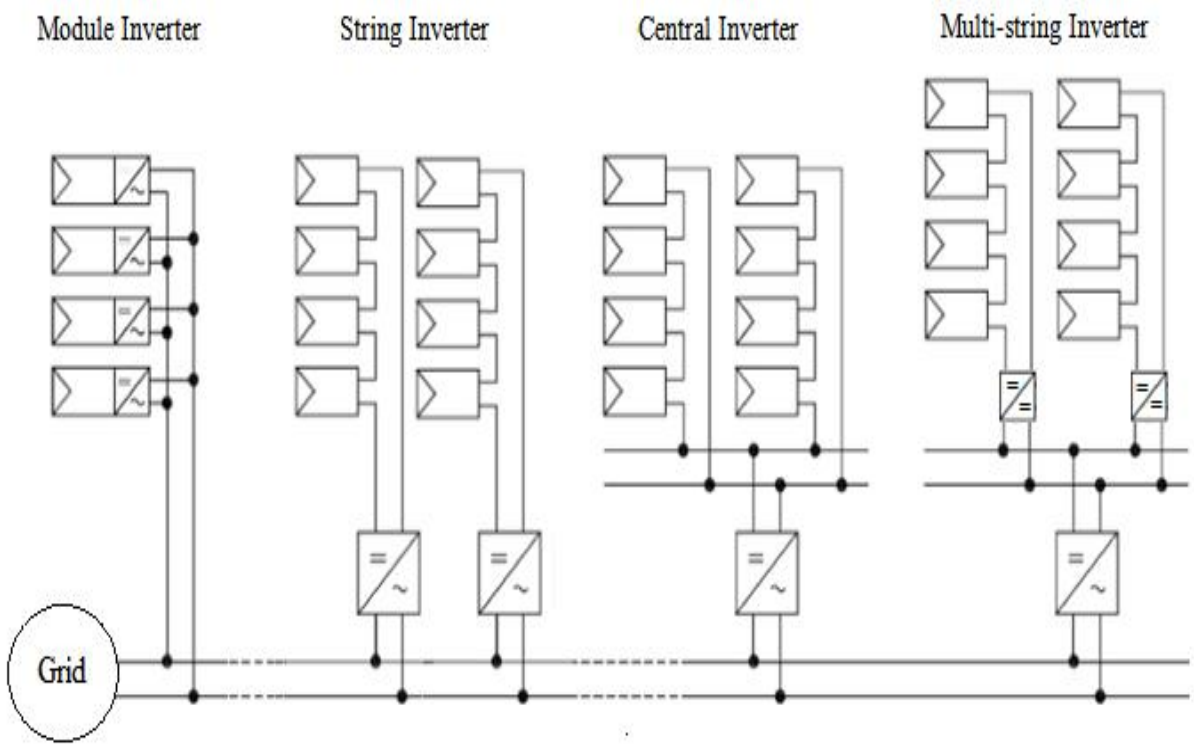



Figure II. 4 Classification des onduleurs PV connectés au réseau électrique

### II. 3. 2. 1 Onduleur Central

L'avantage principal de cette configuration est la réduction des pertes dans la chaine de conversion de puissance par l'utilisation d'un seul onduleur. Dans cette configuration, les chaines solaires sont raccordées à un seul onduleur (onduleur central). Bien que la maintenance de cet onduleur soit relativement facile, cette structure présente des pertes de conversion solaire importantes (un MPPT pour plusieurs modules solaires).

### II. 3 .2. 2 Onduleur modulaire (module inverter)

Pour chaque module solaire, un petit onduleur (entre 50W et 300W) est utilisé. Ensuite, ces onduleurs modulaires sont connectés en parallèle au réseau électrique. Cette structure permet d'obtenir un rendement très élevé avec une durée de vie plus élevée (La duré de vie de

ce type d'onduleur est tés longue par rapport au onduleur centrale), mais avec un coût important et une maintenance assez compliquée.

### II. 3. 2. 2 Onduleur rangé (string inverter)

Au bout de chaque chaine solaire, on utilise un onduleur, ensuite les onduleurs sont connectés au réseau électrique. Donc chaque chaine peut fonctionner à son MPPT qui augmente la fiabilité totale de système.

### II. 3. 2. 3 Onduleur multi-string

Chaque chaine solaire est connectée à un hacheur contrôlé par son propre MPPT pour extraire sa puissance maximale. Les hacheurs sont ensuit raccordés a un seul onduleur qui les connecte au réseau électrique.

Le tableau suivant présent les avantages et inconvénients de chaque technologie

Tableau II. 2 Comparaison entre les différentes topologies [31]

| topologie | avantages | Inconvénients | puissance |
|---|---|---|---|
| Central | - Facile surveiller<br>- Facile maintenir<br>- Faible coût en raison de l'onduleur central | - Pertes CC dans câbles de haute tension<br>- Pertes de puissance dues la centralisation MPPT et le décalage dans les modules PV<br>- Faible fiabilité<br>-Configuration pas flexible | Jusqu'à plusieurs mégawatts |
| String | - Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel<br>- Les pertes dans les diodes de string sont éliminées<br>- Bonne fiabilité<br>- Configuration flexible | - Coût plus élevé par rapport au central<br>- utilisé pour les faibles puissances | 3-5 kW / string |
| Multi-String | - Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de | Tous les strings sont connectés à un seul onduleur donc la | 5kW |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | l'ombrage partiel<br>- Les pertes dans les diodes de string sont éliminées<br>- MPPT et le contrôle de courant sont séparés<br>- L'amplification de tension peut être réalisée par les hacheurs DC-DC | fiabilité du système diminue<br>- Pertes supplémentaires à l'intérieur du hacheur DC-DC<br>- Le coût est plus élevé par rapport au central | |
| Modulaire | - Aucune perte due l'ombrage partiel<br>- Aucune perte de décalage entre les modules<br>- Facile à détecter le défaut des modules<br>- Configuration flexible et extensible | - Coût élevé<br>- Remplacement de l'onduleur en cas de défaut pas facile<br>- Durée de vie des composants électroniques réduite à cause des thermiques additionnelles | jusqu' 500W |

## II. 4 Modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque

### II. 4. 1 Modèle d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est représentée comme un circuit équivalent contenant un générateur de courant (modélisant la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique), une diode (rendant compte des propriétés physiques des cellules semi-conductrices) et deux résistances, shunt et série [32], son schéma est présenté dans la figure (II.5).

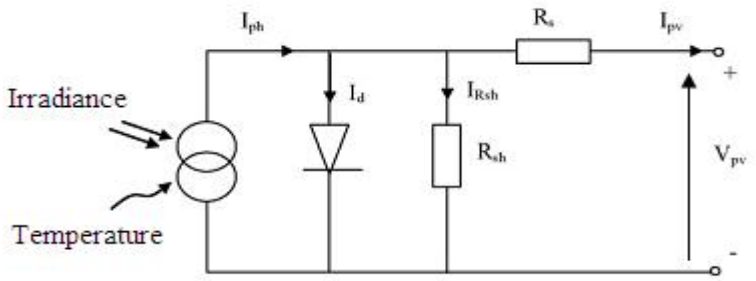



Figure II. 5 Circuit équivalent de la cellule solaire

La cellule comporte une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance en dérivation ou shunt ( $R_P$). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :
- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

### II. 4. 2 Modèle mathématique

D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{II.2}$$

Où $I_{ph}$, est le courant produit par la lumière incidente ($I_{ph}$ est directement proportionnel à l'irradiation du soleil),

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n}.\left(I_{pv,n} + K_i.(T - T_{ref})\right) \tag{II.3}$$

Le courant de la diode est donné par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_o\left[exp\left(\frac{q(V_{pv}+R_sI_{pv})}{nKT}\right) - 1\right] \tag{II.4}$$

Le courant de saturation de diode est donné par la relation suivante [33] :

$$I_o = I_{o,n}.\left(\frac{T_{ref}}{T}\right)^3.exp\left(\frac{qE_g}{nK}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \tag{II.5}$$

Le courant de saturation nominal à la température T est donné dans cette fonction :

$$I_{o,n} = \frac{I_{sc_n}}{\left(\exp\left(\frac{qV_{oc,n}}{nKT}\right)-1\right)} \tag{II. 6}$$

$I_{pv}$ est le courant de la cellule [A], V : La tension de la cellule [V], $R$ : La résistance série de la cellule[Ω], $T$, $T_{ref}$: La température de la cellule réelle et la référence standard (298.15°K) [°K], $q$ : La charge d'électron ($q$ =$1.602 * 10^{-19}C$), $I_0$ est le courant de saturation [A], $K$ : La constante de Boltzman ($1.3854 * 10^{-23}JK^{-1}$), $E_g$: La bonde gap d'énergie de semi-

conducteur (1.12eV), *n* : Le facteur de qualité de diode. G,$G_{ref}$ éclairement réel et éclairement à la condition de référence standard(1000W/$m^2$)[ W/$m^2$]. $K_i$ coefficient de courant/température.

### II. 4. 3 Paramètres de cellule solaire

A partir les courbes courant-tension ou de l'équation caractéristique, on détermine ces caractéristiques d'une cellule solaire qui peuvent faire la différence entre les différents types de cellules éclairées dans des conditions identiques.

### II. 4. 3. 1 Courant de court circuit

Le courant de court circuit ($I_{sc}$) est le courent maximal généré par la cellule où il apparaît lorsqu'il y a un court-circuit (la tension aux bornes de cellules est nulle). L'expression approchée du courant de court circuit est donnée par l'équation suivante [11] :

$$I_{sc} = \frac{I_L}{\left(1+\frac{R_S}{R_P}\right)} \tag{II.7}$$

### II. 4. 2. 2 Tension de circuit ouvert

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsqu'aucun courant ne circule (c'est la tension maximale d'une cellule). Sa valeur est exprimée dans cette équation [19] :

$$V_{oc} = \left(\frac{nKT}{q}\right) * ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_t ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \tag{II.8}$$

Où : $V_t = \frac{nKT}{q}$

### II. 4. 2. 3 Facteur de forme

Le facteur de forme *FF* est le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{opt} * I_{opt}$) de la cellule et le produit $I_{sc} * V_{oc}$

Où : $I_{sc}$ intensité de court-circuit et $V_{oc}$ tension de circuit ouvert

$$FF = \frac{V_{opt}*I_{opt}}{I_{sc}*V_{oc}} \tag{II.9}$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

### II. 4. 2. 4 Le Rendement

Le rendement ($\eta$), de cellule solaire désigne le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il représente le rapport entre la puissance maximale fournée par la cellule et la puissance lumineuse incidente $P_{inc}$.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF*I_{cc}*V_{co}}{P_{inc}} \quad \text{(II.10)}$$

### II. 4. 3 Le module photovoltaïque

Une cellule est un élément fragile, dont la puissance est beaucoup trop faible pour la plupart des applications [34]. Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts à environ 0,5 Volt [35]. En conséquence, l'association des cellules en série et en parallèle peut construire un générateur photovoltaïque qui donne la puissance désirée à l'application visée. Donc la puissance d'un module photovoltaïque est donnée par la relation suivante :

$$P_{pv} = N_s.V_{pv}.N_p.I_{pv} \quad \text{(II.11)}$$

$N_s$ : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série.

$N_p$ : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle.

La figure II.6 montre un exemple d'un module au silicium cristallin constitué d'un certain nombre des cellules solaires en série et en parallèle pour obtenir la puissance désirée.

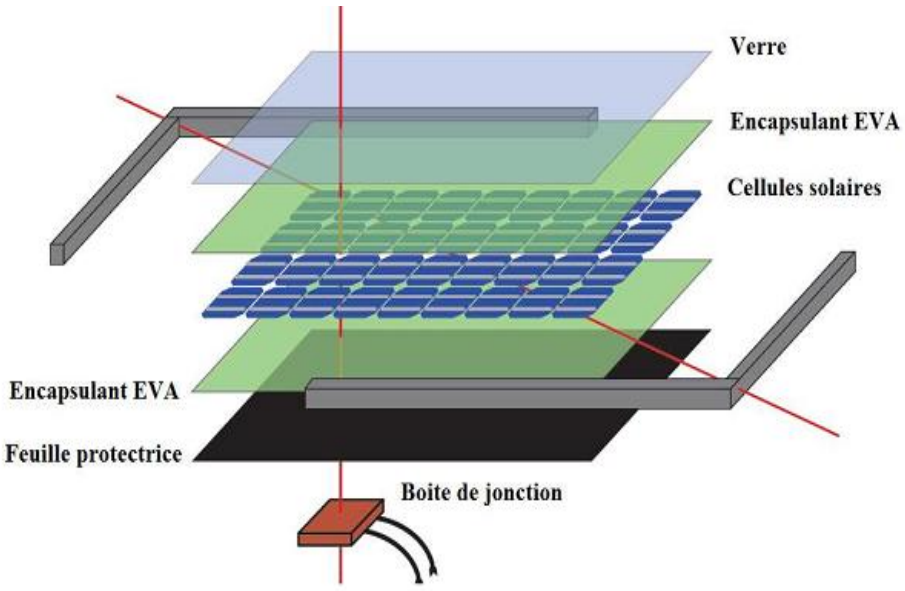



Figure. II. 6 Structure d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.

### II. 4. 3. 1 Module série

Quand le nombre ($N_s$) des cellules photovoltaïques sont reliés en série, la tension de sortie du module solaire est la somme des tensions de chaque cellule. Le courant est le même qui circule dans chaque cellule comme il est donné par les relations suivantes:

$$V_{co,ns} = N_s V_{co} \quad \text{(II.12)}$$

$$I_{cc,ns} = I_{cc} \quad \text{(II.13)}$$

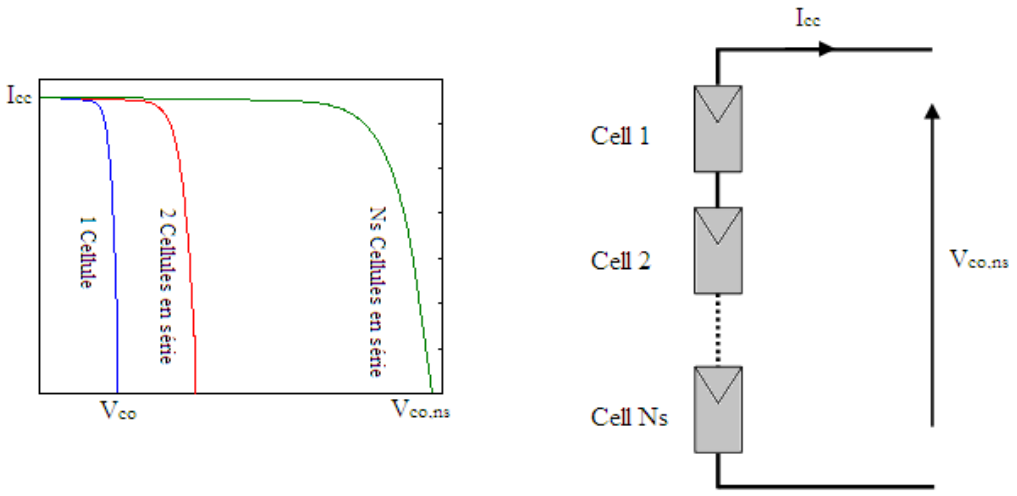



Figure II. 7 Caractéristique résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en sérié

### II. 4. 3. 2 Module en parallèle

Le nombre ($N_p$) de modules identiques sont joints en parallèle. La tension résultante est la même pour chaque module et le courant résultant est la somme des courants de chaque cellule.

$$I_{cc,Np} = N_p I_{cc} \quad \text{(II.14)}$$

$$V_{co,Np} = V_{co} \quad \text{(II.15)}$$

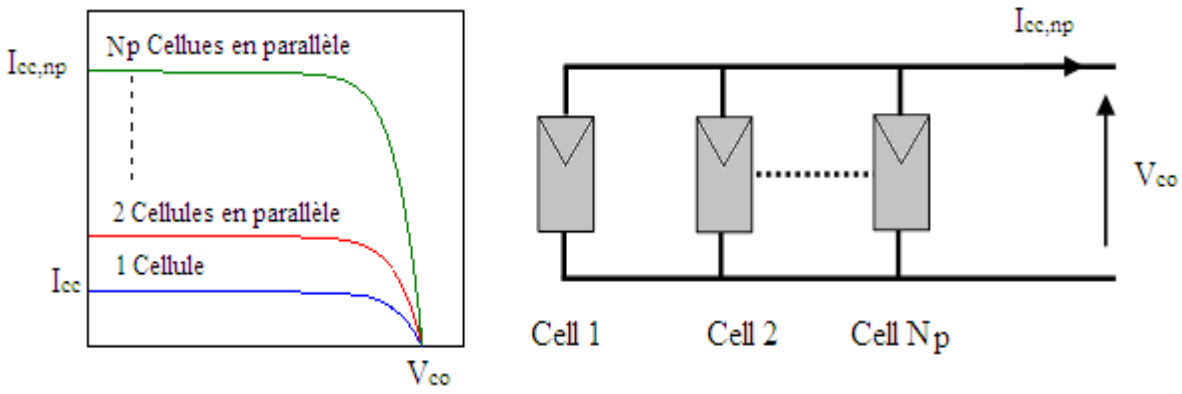



Figure II. 8 Caractéristique résultantes d'un groupement de (Np) cellules en parallèle

### II. 4. 3. 3 Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V), P(V)

Les figures (II.9 et II.10) montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques courant- tension (I(V)) et puissance- tension (P(V)) du module photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement et de la température.

Le courant change frottement avec la variation de l'éclairement tandis que la tension ne change que légèrement. Ce qui se signifie l'augmentation de la puissance lorsque l'éclairement augmente. Alors que la température s'influence beaucoup sur la tension que le courant ce qui diminuer la puissance produite. En résulte, la puissance produite varie avec la variation des conditions climatiques ; L'augmentation de l'éclairement augmente la puissance au contraire à la température qui l'abaisse.

La variation de la température et de l'éclairement varient le point de puissance maximale proportionnellement. En conséquence, le système nécessite une commande qui puisse suivre ce point de puissance maximale pendant la variation de grandeurs climatiques.

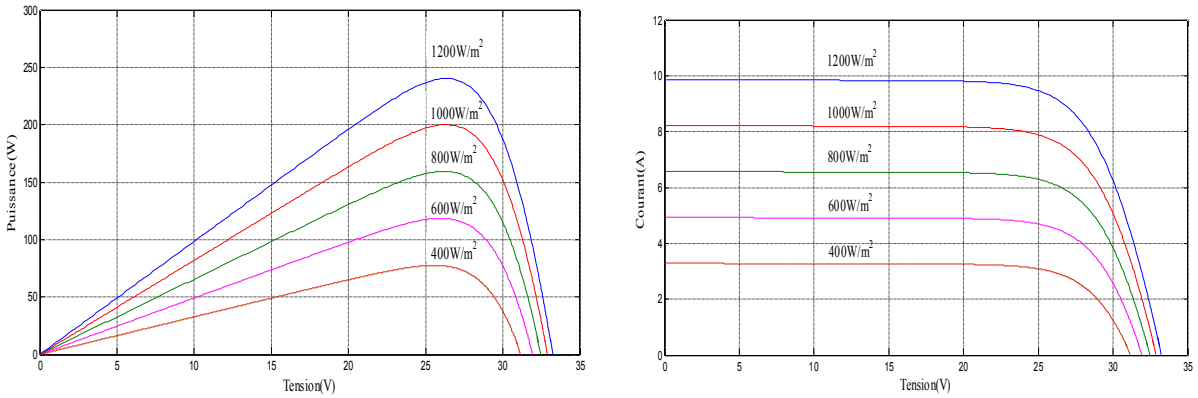



Figure II. 9 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques du module photovoltaïque à T=25°C

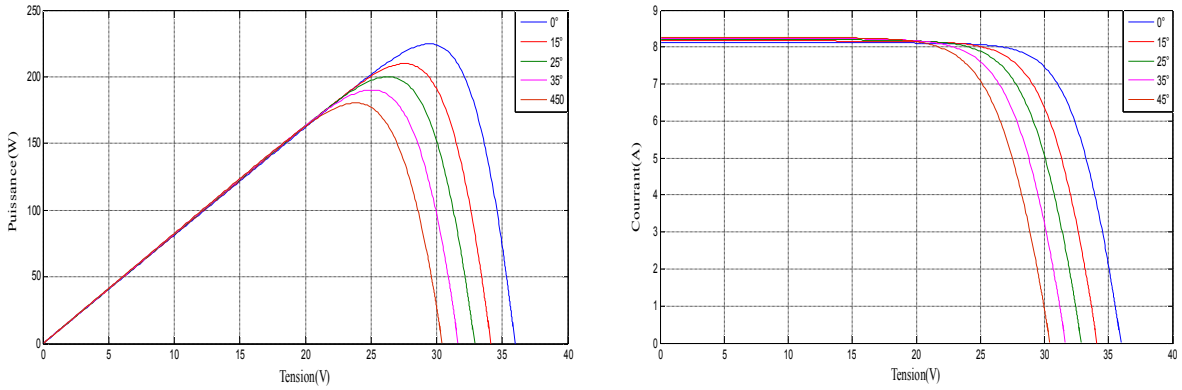



Figure II. 10 Influence de la température sur les caractéristiques module photovoltaïque à G=1000°C

### II. 4. 4 Le Générateur photovoltaïque

Les modules ont une puissance nominale unitaire faible qui varie, selon les modèles proposés, de quelques watts à quelques dizaines de watts [8]. Donc, pour satisfaire l'énergie demandée, il est nécessaire de regrouper les modules en série et en parallèle pour former des générateurs solaires à grande puissance. La puissance générée par le générateur PV est la combinaison de la puissance dérivée de chaque module PV [36].

Pour le générateur, la caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ est obtenue par :

$$I_{PV} = N_{mp} I \tag{II.16}$$

$$V_{PV} = N_{ms} V \tag{II.17}$$

Où: $N_{mp}$est le nombre des modules en parallèles et $N_{ms}$ le nombre de modules en séries.

La protection du système photovoltaïque contre les défaillances destructives en cas d'ombrage reste un facteur très important pour augmenter la durée de vie de nos panneaux solaires. On protège les modules avec des diodes by-pass afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraine un surchauffe voire une destruction de celles-ci [37]. Ces diodes restent bloquées lorsque la cellule fonctionne normalement et passent lorsque la cellule est en polarisation inverse (cellule ombrée ou endommagée). Celles-ci sont placées dans la boite de jonction à l'arrière des modules.

Une autre diode, appelée diode de blocage, est généralement connectée en série avec chaque chaîne pour empêcher le flux de courant inverse et protéger les modules [31].

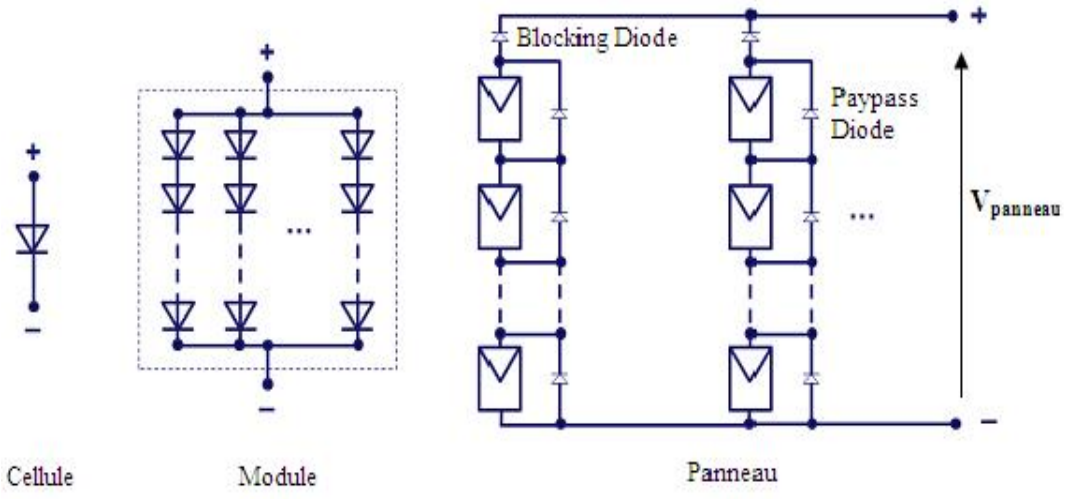



Figure II. 11 Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques

### II. 4. 5 Inclinaison et orientation des panneaux solaire

Parmi les différentes techniques d'exploitation efficace de l'énergie PV, l'installation de panneaux solaires à un angle d'inclinaison optimal peut jouer un rôle important afin d'améliorer l'efficacité de production des unités photovoltaïque [38]. L'inclinaison optimale correspond à l'angle qui permettra aux panneaux d'être positionnés perpendiculairement aux rayons du soleil. Mais le soleil bouge toujours. En été, le soleil est plus haut dans le ciel, ce qui augmente la durée d'ensoleillement d'une journée, Ainsi, pour que les rayons du soleil frappent perpendiculairement le module solaire doit être incliné à 10°. Mais cette inclinaison de 60° aurait un impact négatif sur la quantité d'électricité solaire produite en hiver. Car en hiver, le soleil est plus bas, ce qui diminue la durée d'ensoleillement d'une journée. Donc, le module solaire doit être incliné de 30 à 60° pour que les rayons solaires soient perpendiculaires au panneau. Par conséquent, l'inclinaison du panneau est la moyenne entre ces deux inclinaisons ce qui donne un angle compris entre 30° à 35°.

En général, Cet angle d'inclinaison augmente avec la latitude, plus la zone d'installation est éloignée de l'équateur, plus l'angle d'inclinaison doit être élevé.

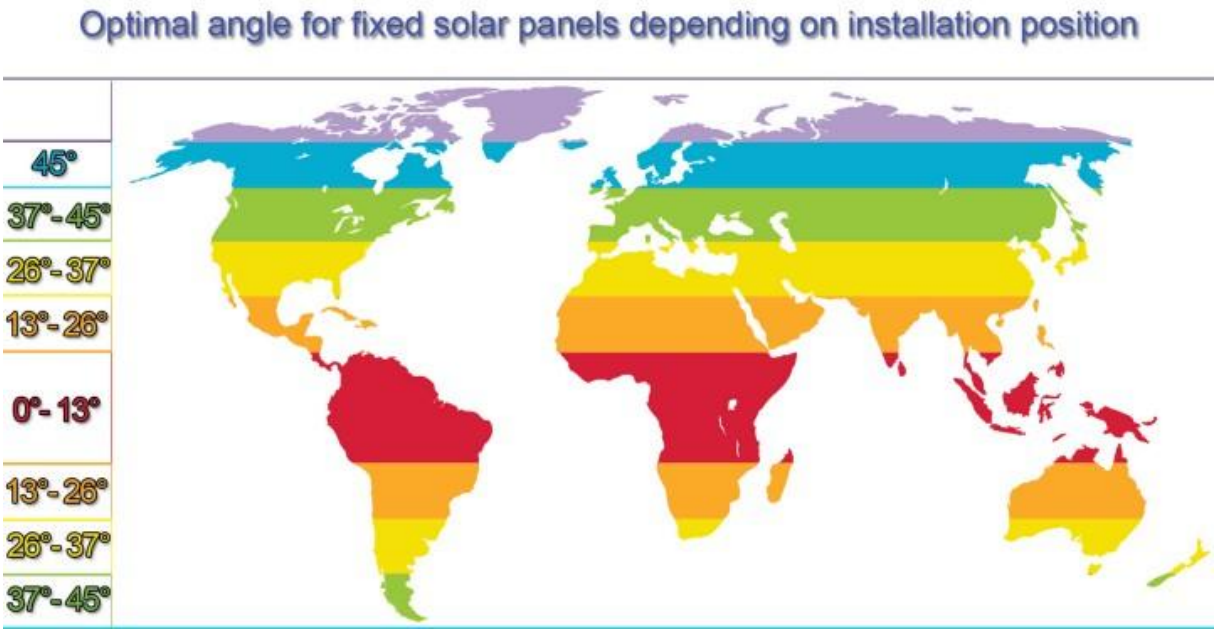



Figure II. 12 L'ongle d'inclinaison optimale de panneaux solaires selon la position d'installation [39]

L'inclinaison insuffisante réduit un peu la productivité de l'installation photovoltaïque mais n'arrête pas sa fonctionnalité, donc elle ne constitue pas une condition suspensive pour

l'installation. L'orientation des panneaux solaires est encore un facteur important pour obtenir un rendement productif optimal. Dans l'hémisphère nord, les panneaux doivent être orientés vers le sud, tandis que le nord est préférable pour l'hémisphère sud.

Cependant, pour éviter l'ombre d'un élément à l'autre une distance minimale entre les rangées de panneaux photovoltaïques face au soleil doit être respectée. Si la zone de l'installation est plate, cette distance est calculée en fonction de l'angle d'inclinaison, la longueur et la hauteur de panneaux solaire. Si cette zone d'installation est inclinée dans la même direction que les panneaux montés, cette distance peut être réduite. Dans le cas contraire, où la zone d'installation est inclinée dans le sens opposée que les rangées solaire, cette distance doit être plus grande comme montre la figure suivante ;

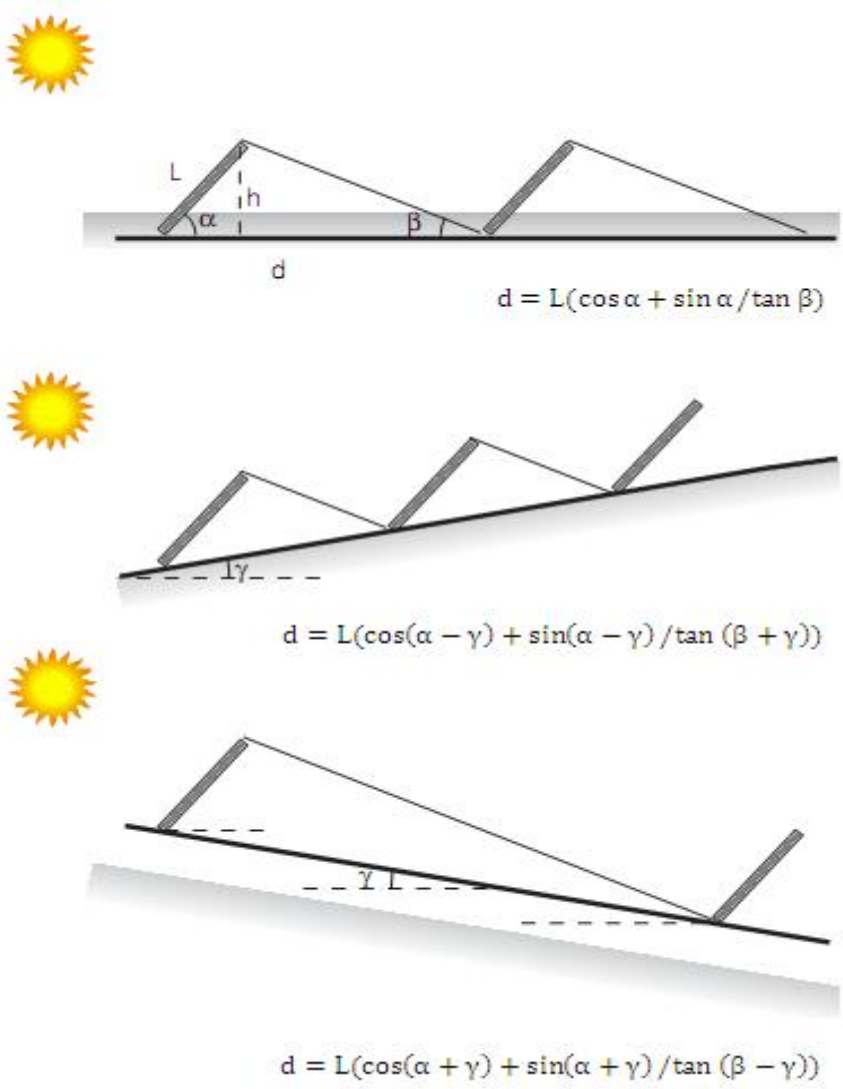



Figure .II. 13 La distance minimale entre les rangées solaire

## II. 5 Synthèse de la commande MPPT de système photovoltaïque

Le schéma de la figure II. 14, représente un système qui constitue d'un générateur photovoltaïque et un convertisseur DC/DC. Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal [40]. Il existe plusieurs types de convertisseurs DC/DC qui prouvent être utilisés dans le système photovoltaïque selon l'installation envisagée ; convertisseurs élévateur, convertisseur abaisseur et le convertisseur élévateur- abaisseur.

Dans un système photovoltaïque, Le point de puissance maximale varie proportionnelle avec la variation d'ensoleillement et de température. Plusieurs méthodes sont utilisées pour y poursuivre, dont le principe de base étant de modifier le rapport cyclique de convertisseurs DC/DC ce qui varie la tension de sortie et donc la puissance produite.

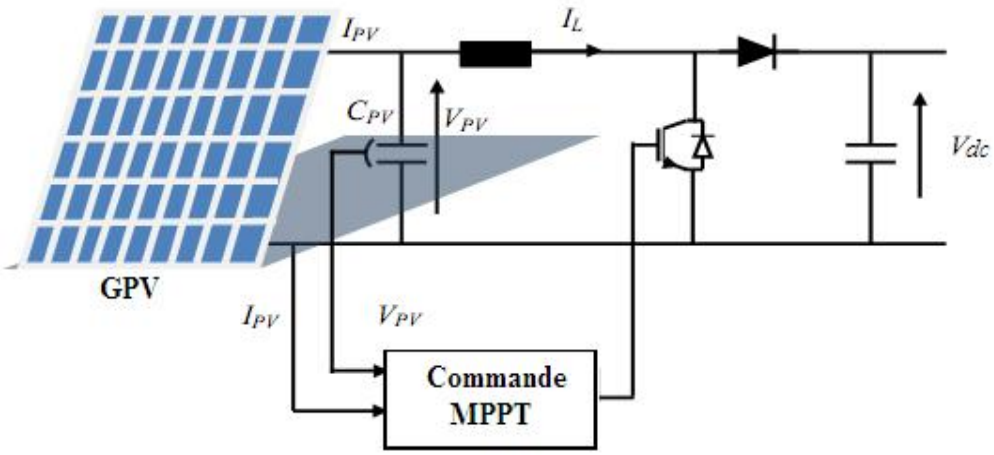



Figure II. 14 Synthèse de la commande MPPT d'un générateur photovoltaïque

Le convertisseur utilisé dans notre système photovoltaïque est de type DC/DC élévateur (Boost). Son schéma électrique équivalent est présenté par la figure (II.15).

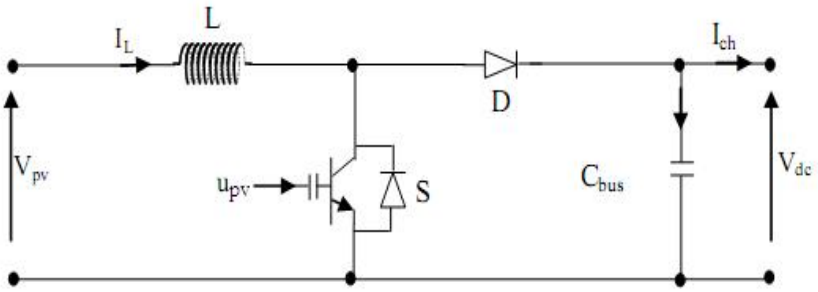



Figure II. 15 Hacheur élévateur

Le convertisseur est représenté par le système d'équation suivant :

$$V_{pv} = L\frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - u_{pv}) \quad \text{(II.18)}$$

$$(1 - u_{pv})I_L = C\frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad \text{(II.19)}$$

Où, $u_{pv}$ : représente le rapport cyclique

La maximisation de la puissance PV reste toujours un défi majeur [41]. Le bon choix de la méthode utilisée pour le suivi du point de puissance maximale PPM a un impacte significatif sur l'efficacité du système photovoltaïque. Il existe de nombreuses méthodes différentes pour maximiser la puissance d'un générateur PV. Les plus utilisées sont : la perturbation et l'observation, incrémentation de l'inductance, la logique floue. Plusieurs aspects varient ces méthodes comme la vitesse de convergence, la stabilité du système, la simplicité...etc.

### II. 5. 1 Technique de perturbation et d'observation (P&O)

Cette méthode est basée sur le principe des petites perturbations de la tension du système PV ($V_{pv}$) à partir de sa valeur initiale, en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC) [42]. Au point de puissance maximale la dérivée de puissance par rapport à la tension est égale à zero.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{(II.20)}$$

Le schéma qui explique le principe de fonctionnement de P&O est illustré dans la figure II. 16. Si les variations de puissance ($\Delta P$) et de tension ($\Delta V$) sont positives, l'algorithme continue sa perturbation dans le même sens, en augmentant le rapport cyclique, sinon, si ces variations sont négatives, la direction de perturbation est inversée. Cette méthode est largement utilisée grâce à sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Mais elle représente une grande oscillation qui peut perdre beaucoup d'énergie. Face à une variation rapide de l'ensoleillement solaire l'algorithme P&O prends beaucoup du temps pour suivre le PPM. Ensuite, le système continue l'oscillation même au régime permanant auteur le PPM perdant une énergie importante.

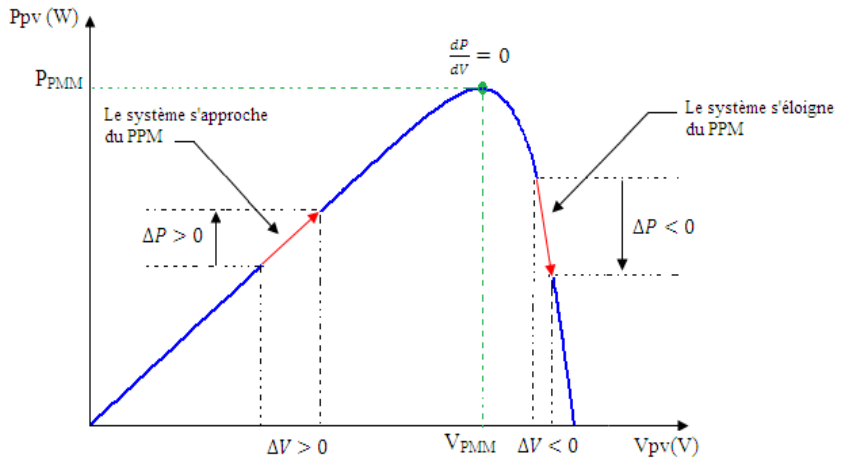



Figure II. 16 Principe de fonctionnement de P&O

### II. 5. 2 Conductance incrémentale (INC)

A partir de son nom, cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du générateur photovoltaïque et sa position par rapport au point de fonctionnement maximale.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \leftrightarrow \frac{dUI}{dU} = 0 \leftrightarrow \frac{dU}{dU} I + \frac{dI}{dU} U \\ \frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

Le terme $dI/dU$ représente le terme d'incrémentation de conductance et $I/U$ est l'opposé de la conductibilité instantanée de panneau solaire. L'algorithme calcule donc le rapport I/U, et le compare à la dérivée de I par rapport à U. Quand les deux membres de cette équation sont exactement opposés, nous avons atteint le point de puissance maximale. Sinon, si $\mathrm{dI/dU} > -\mathrm{I/U}$ le point de fonctionnement est sur la gauche de PPM. Alors que, si $\mathrm{dI/dU} < -\mathrm{I/U}$ le point de fonctionnement est sur la droite de PPM.

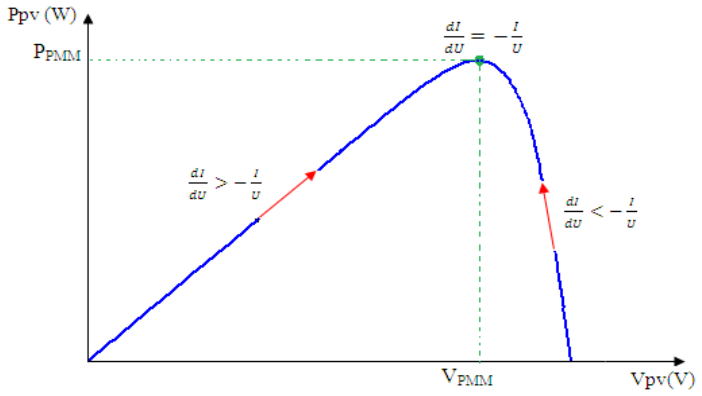



Figure II. 17 Principe de fonctionnement de la méthode INC

### II. 5. 3 Synthèse de régulateur flou

Étant donné que les panneaux photovoltaïques sont facilement affectés par les conditions environnementales, le point de fonctionnement photovoltaïque peut changer [43]. Par conséquent, l'utilisation de techniques de contrôle pour maximiser la puissance de sortie et améliorer l'efficacité PV est nécessaire. Les méthodes P&O et INC sont toute deux des méthodes itératives, simples à élaborer, répondent aux variations des conditions climatiques, cependant elles incluent certaines imprécisions tels que la valeur de la puissance au PPM, et la présence d'oscillations importantes [44].

En raison de sa grande efficacité et de ses performances en cas de changements externes, la technique FLC est devenue l'un des contrôleurs les plus utilisés dans les systèmes d'énergie renouvelable [45]. En outre, cette technique permet de suivre la puissance maximale dans des conditions météorologiques d'ombrage partiel par rapport à d'autres méthodes de calcul [46].

La structure générale du contrôleur flou est illustrée dans la figure (II. 18). Ce contrôleur a deux entrées ; l'erreur (e) et son dérivateur ($de$), qui ont passé par trois étapes de traitement de l'information : fuzzification, défuzzifaction et l'inférence pour donne la sortie ($du$). Le rôle de chaque bloc est résumé ci-dessous:

- Bloc de fuzzification, laquelle permet de transformer les grandeurs mesurées d'entrée en des grandeurs floues [47];
- Bloc de règles d'interférence floues, qui contient les termes décrivant la conduite de la commande appliquée pour garantir un poursuivre rapide du contrôleur jusqu'au point de puissance maximale.
- Bloc de défuzzification à la sortie, ce bloc produit la valeur réaliste de la variation du rapport cyclique Δu en se basant sur la méthode du centre de gravité [48].

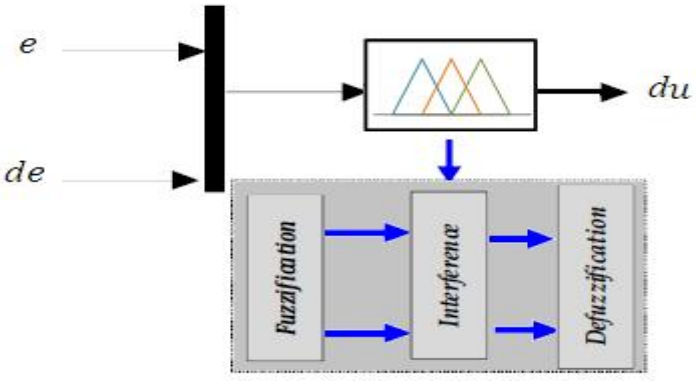



Figure II. 18 Schéma bloc de synthèse d'un régulateur flou

Dans notre cas, les entrées du régulateur flou sont les dérivées de puissance et de tension ($dP_{pv}$ $et$ $dV_{pv}$) comme le montre la figure (II. 19), dont l'erreur et la variation de l'erreur et dans les équations suivantes :

$$e_{pv}(k) = \frac{P_{pv}(k)-P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k)-V_{pv}(k-1)} \quad \text{(II.22)}$$

$$de_{pv}(k) = e_{pv}(k) - e_{pv}(k-1) \quad \text{(II.23)}$$

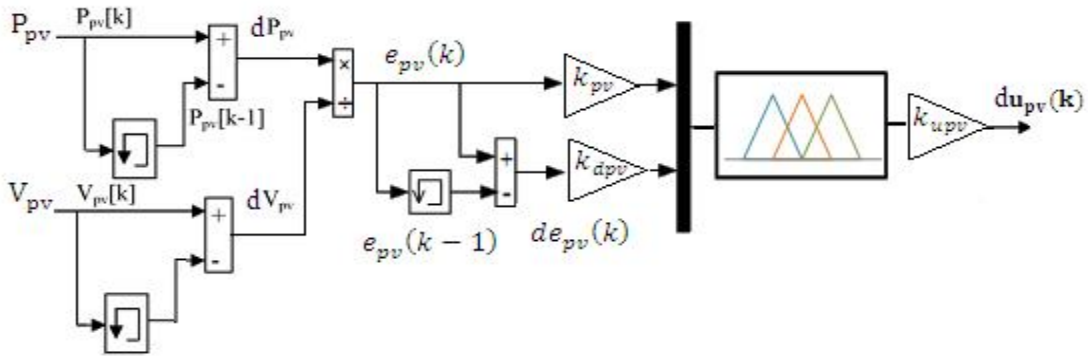
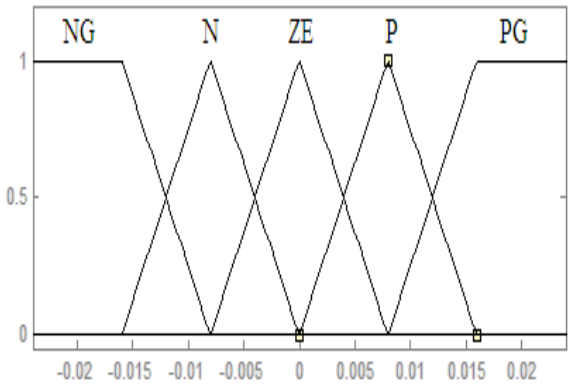



Figure II. 19 Synthèse du contrôleur flou de système PV

Les fonctions d'appartenances de ces entres et de la sortie $du_{pv}$ sont données dans les figures (II. 20) et (II. 21).



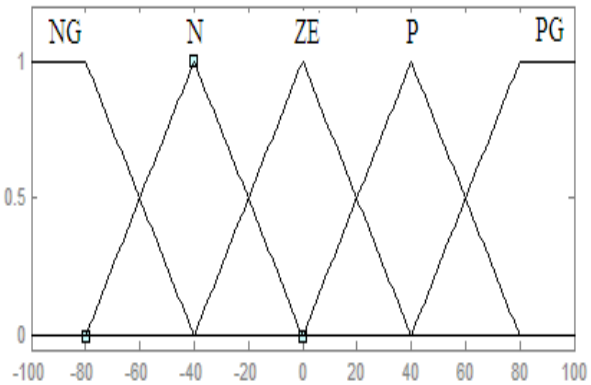




Figure II. 20 Fonction d'appartenance de ($e_{pv}$, $de_{pv}$) Figure II. 21 Fonction d'appartenance de $\boldsymbol{du_{pv}}$

Apres la variation des entrées (puissance et tension), on détermine la sortie $du_{pv}$ comme il est présenté dans le tableau (1), où les symboles NG, N, ZE, P, PG signifie respectivement: Négatif grand, Négatif, Zéro, Positif and Positif grand.

Tableau II. 3 La base des règles

| $du_{pv}$ | | $de_{pv}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NG | N | ZE | P | PG |
| $e_{pv}$ | NG | ZE | ZE | PG | PG | PG |
| | N | ZE | ZE | P | P | P |
| | ZE | P | ZE | ZE | ZE | N |
| | P | N | N | N | ZE | ZE |
| | PG | NG | NG | NG | ZE | ZE |

## II. 6 Stratégie de contrôle de l'onduleur

Les courants de sortie, du côté AC de l'onduleur, sont contrôlés à l'aide d'une commande vectorielle qui nous assure le contrôle indépendant du flux de puissance active et réactive entre l'onduleur et le réseau et par conséquent, le courant injecté dans le réseau a une faible distorsion qui est pratiquement en phase avec la tension du réseau [47]. En général, la commande de l'onduleur se compose de trois parties essentielles qui sont le contrôleur de courant, le contrôleur de tension continue du bus DC et la boucle à verrouillage de phase (PLL).

Les tensions simples à la sortie de l'onduleur sont données par l'équation (III. 24) ;

$$\begin{cases} V_{inva} = V_a - \left(L_f \frac{dI_a}{dt} + R_f I_{ia}\right) \\ V_{invb} = V_b - \left(L_f \frac{dI_b}{dt} + R_f I_{ib}\right) \\ V_{invc} = V_c - \left(L_f \frac{dI_c}{dt} + R_f I_{ic}\right) \end{cases} \quad \text{(III. 24)}$$

Après la transformation de PARK, les équations de tensions dans le repère d-q deviennent comme suit;

$$\begin{cases} V_{invd} = V_d - \left(L_f \frac{dI_d}{dt} + R_f I_d\right) - \omega_s L_f I_q \\ V_{invq} = V_q - \left(L_f \frac{dI_q}{dt} + R_f I_q\right) + \omega_s L_f I_d \end{cases} \quad \text{(III.25)}$$

Les puissances sont donnés par cette fonction ;

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}\left(V_d I_d + V_q I_q\right) \\ Q = \frac{3}{2}\left(V_d I_q - V_q I_d\right) \end{cases} \quad \text{(III.26)}$$

La commande vectorielle (VOC) est appliquée pour séparer la commande des puissances active et réactive. Ainsi, la rotation de la référence d-q est effectuée avec le vecteur de tension du réseau.

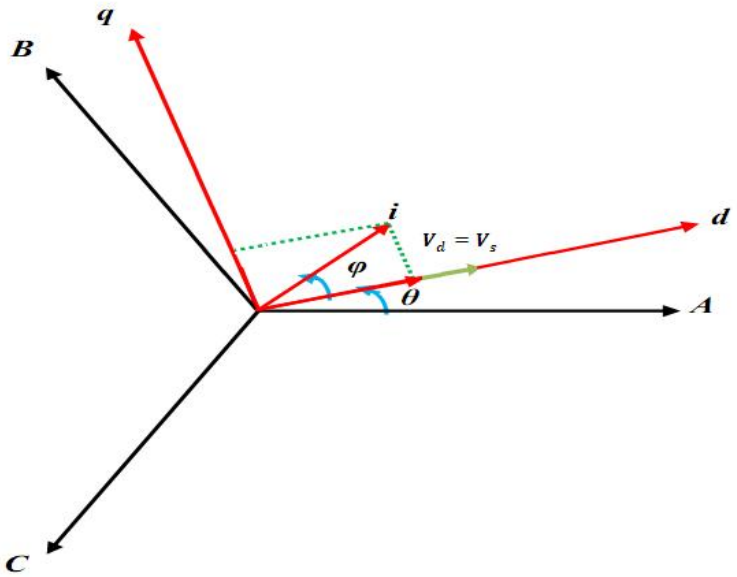



Figure .II. 22 Modèle de réseau dans le repère dq

Après cette figure, nous avons ;

$$\begin{cases} V_d = V_s \\ V_q = 0 \end{cases} \tag{III.27}$$

Par conséquence, les puissances injectées dans le réseau (P, Q) seront contrôlées indépendamment par les courants $I_d$ et $I_q$, respectivement [45]. Ainsi, les puissances P, Q peuvent être exprimées par les équations (III. 28) [49] :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} V_d I_d \\ Q_g = -\frac{3}{2} V_d I_q \end{cases} \tag{III.28}$$

- **Contrôleur de courent**

Après l'équation (II. 25), les équations du courant sont donnés par :

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_d}{dt} = V_d - R_f I_d - \omega_s L_f I_q - V_{invd} \\ L_f \frac{dI_q}{dt} = V_q - R_f I_q + \omega_s L_f I_d - V_{invq} \end{cases} \tag{III.29}$$

Après cette équation (III. 29), les courants sont couplés entre eux par l'intermédiaire de $\omega_s L_f$ et $\omega_s L_f I_d$ ce qui signifie que si nous contrôlons l'un, l'autre sera modifié en conséquence rendant leur control indépendant très difficile. Nous devons donc procéder à un contrôle de découplage afin de les contrôler indépendamment. Nous utilisons la stratégie de contrôle de découplage par anticipation, c'est-à-dire que nous faisons :

L'équation d'état du découplage après l'utilisation des régulateurs PI est la suivante :

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_d}{dt} + R_f I_d = \left(k_{dg,p2} + \frac{k_{dg,i2}}{s}\right)(I_d^* - I_d) \\ L_f \frac{dI_q}{dt} + R_f I_q = \left(k_{dg,p2} + \frac{k_{dg,i2}}{s}\right)(I_q^* - I_q) \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

En conséquence, les expressions de courants sont récriées par l'équation (II.31) ;

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_f}\left(k_{dg,p2} + \frac{k_{dg,i2}}{s}\right) I_d^* - \frac{1}{L_f}\left[\left(k_{dg,p2} + \frac{k_{dg,i2}}{s}\right) + R_f\right] I_d \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_f}\left(k_{dg,p2} + \frac{k_{dg,i2}}{s}\right) I_d^* - \frac{1}{L_f}\left[\left(k_{dg,p2} + \frac{k_{dg,i2}}{s}\right) + R_f\right] I_q \end{cases} \quad \text{(III.31)}$$

Après avoir découplé les courants (III. 31), nous pouvons contrôler $I_d$ et $I_q$ indépendamment, ce qui permet de contrôler de manière resperctive les puissances active et réactive indépendamment. Donc, La composante réactive du courant ($I_q$) est utilisée pour contrôler la puissance réactive injectée au réseau électrique. Ainsi, pour satisfaire le facteur de puissance unitaire, la valeur de référence imposée du courant $I_q$ est zéro. Ensuite, ce contrôleur compare cette valeur $I_q^*$ à la valeur mesurée $I_q$ pour estimer la tension de référence ($V^*_{inv\text{-}q}$). La valeur ($I_d^*$) du contrôleur de tension continue est comparée avec le ($I_d$) pour estimer la composante de référence de l'axe d de la tension de l'onduleur ($V^*_{inv\text{-}d}$).

Les expressions de tension de control sont données par cette équation ;

$$\begin{cases} V_{invd}^* = V_d + \left(k_{d,p1} + \frac{k_{d,i1}}{s}\right)(I_d^* - I_d) - \omega_s L_f I_q \\ V_{invq}^* = V_q + \left(k_{d,p1} + \frac{k_{d,i1}}{s}\right)(I_q^* - I_q) + \omega_s L_f I_d \end{cases} \quad \text{(III.32)}$$

- **Contrôleur de tension continue**

En considérant que les pertes de l'onduleur sont négligeables, la puissance active peut être écrite comme suit :

$$P_g = \frac{3}{2} V_d I_d = V_{dc} I_{dc} \quad \text{(III.33)}$$

En général, la composante active du courant ($I_d$) est utilisée pour réguler la puissance active par la régulation de la tension continue qui s'applique à maintenir la tension du bus DC aux bornes du condensateur à une valeur constante. Ce contrôleur compare la tension mesurée ($V_{dc}$) avec sa valeur de référence $V_{dc}^*$ pour estimer la composante de référence de l'axe d du courant de l'onduleur ($I_d^*$).

$$I_d^* = \left(k_{d,pdc} + \frac{k_{d,ipdc}}{s}\right)(V_{dc}^* - V_{dc}) \quad \text{(III.34)}$$

- **Contrôleur de PLL**

Un convertisseur de puissance connecté au réseau correspond parfaitement à la philosophie des PLL puisqu'il doit travailler en harmonie avec le réseau [50]. En détail, une estimation précise de l'angle de phase joue un rôle crucial pour le contrôle des flux d'énergie et du facteur de puissance [51]. Pour contrôler le courant et la tension du réseau afin obtenir la synchronisation, il est indispensable de détecter la variation de la phase et de la fréquence avec la tension du réseau de manière précise et rapide [52]. Cette boucle à verrouillage de phase (PLL) consiste principalement de trois éléments essentiels qu'ils sont ; le détecteur de phase (DP), le correcteur et l'oscillateur commandé en tension OCT. Le schéma block d'est présenté dans la figure suivante.

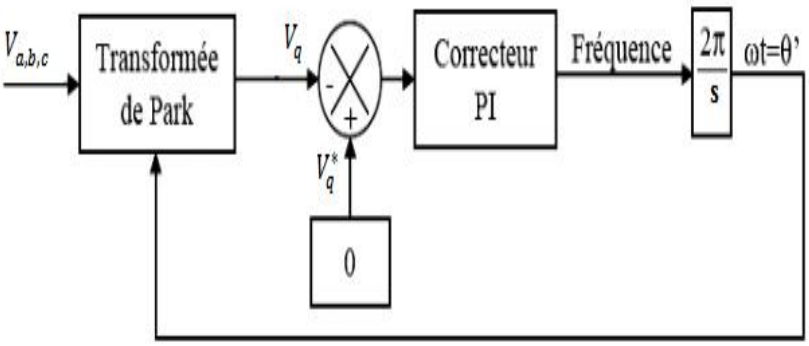



Figure II. 23 Le contrôleur PLL

Le schéma suivant détaille le control global de l'onduleur utilisé pour la connexion de système photovoltaïque au réseau électrique. Un filtre LR est utilisé pour minimiser les harmoniques de courant injectées au réseau et à la charge.

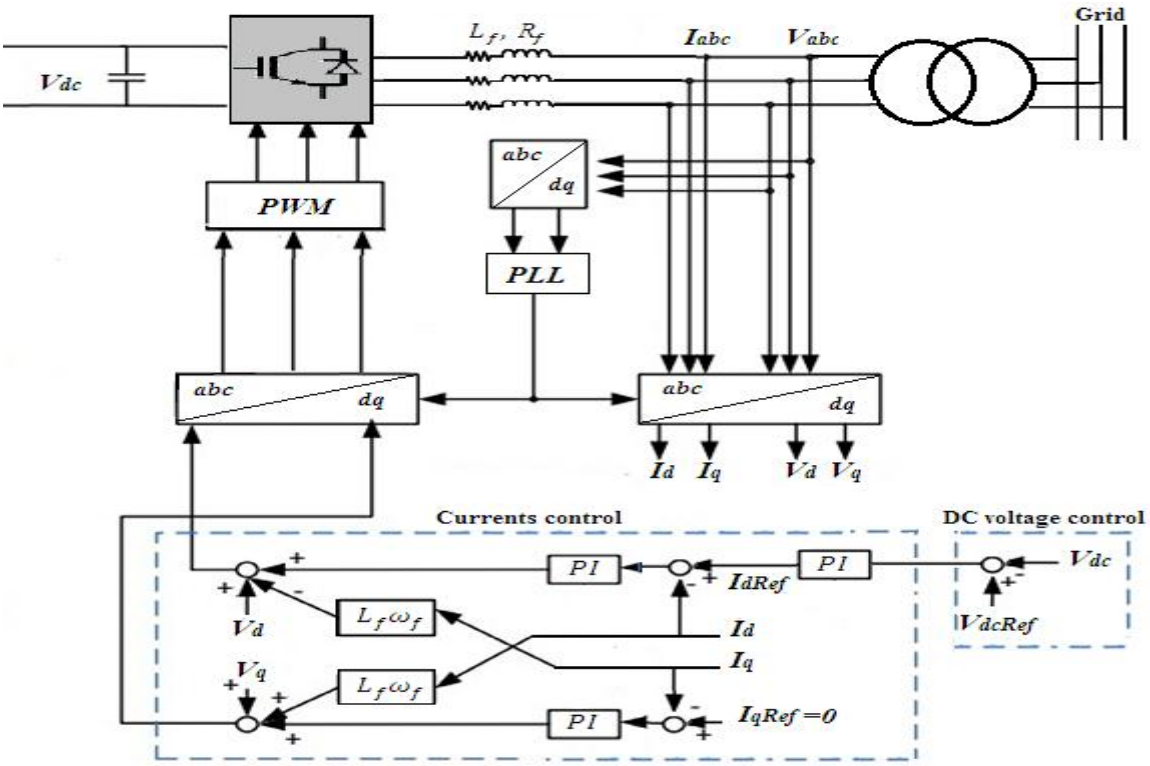



Figure II. 24 Synthèses la commande de l'onduleur

## II. 7 Résultats de la simulation

La figure (II. 25) représente la configuration du système photovoltaïque étudié dans ce chapitre. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC/DC contrôlé par la logique flou pour suivre le point de fonctionnement optimal, puis l'ensemble est connecté au réseau électrique via un convertisseur DC/AC commandé par une stratégie qui permet de découpler le contrôle de puissance active et réactive et également un filtre RL qui réduit les harmoniques introduites dans les courants électriques injectés au réseau électrique et à la charge.

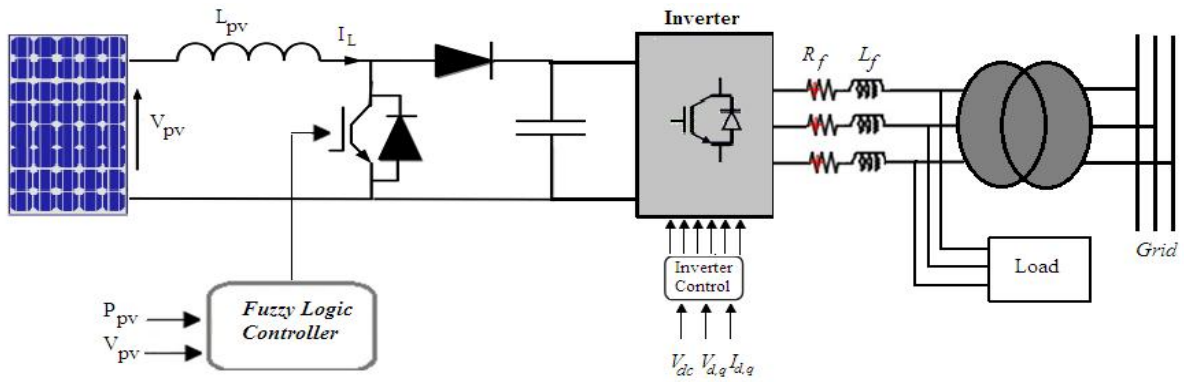



Figure II. 25 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Les résultats de la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique sont présentés dans les figures suivantes pour tester l'efficacité des commandes appliquées ; la logique floue à suivre la puissance maximale, la régulation de la tension du bus DC à stabiliser la tension à une valeur constante et la commande vectorielle à garder un facteur de puissance unitaire face aux variations de l'éclairement (Figure II. 27) et de la charge (Figure II. 28).

La variation de l'ensoleillement varie frottement le courant photovoltaïque comme il est illustré dans la figure (II. 30). Cette variation du courant provoque la variation de la puissance produite ($P_{pv}=I_{pv}*V_{pv}$).

La Figure (II. 28) montre bien l'effet de l'ensoleillement sur la puissance photovoltaïque qui suit la variation d'irradiation clairement ; pour un ensoleillement de 1000W/m$^2$ le générateur PV donne une puissance de 50kW, le contrôleur flou prends 0.1s pour que le système atteint le régime permanant. Cette puissance est diminue jusqu'un 30kW à 600W/m$^2$ prenant 0.05s en régime transitoire. Cette puissance soit maximale à 1200W/m$^2$ (60kW) entre 3s et 4s et encore diminue à 40kW à t=4s (800W/m$^2$). La puissance réactive est presque nulle avec des petites variations.

Dans la figure (II. 29), les puissances (active et réactive) du réseau électrique sont illustrées ; dans l'intervalle [0 2s] où aucune charge n'est connectée, la puissance photovoltaïque (50kW) est complètement injectée au réseau électrique. Dans les intervalles [2s 3s] et [4.5s et 5s] la puissance demandée est supérieure à la puissance produite, le générateur photovoltaïque est incapable de la satisfaire, donc la puissance déficitaire est récupérée par le réseau. A t=4.5 s la puissance photovoltaïque produite est 40kW alors que la charge est 10kW, donc la puissance excédentaire (30kW) est injectée au réseau électrique. La puissance réactive injectée au réseau électrique est égale à zéro. Ce que montre la bonne fonctionnalité de l'onduleur à gérer la puissance entre le système photovoltaïque et le réseau grâce à la grande efficacité de la commande utilisée.

La figure (II. 31) montre que la tension continue est bien régulée à une valeur de 400V malgré la variation de l'éclairement et de la charge ce que prouve l'efficacité de la régulation de bus DC.

Le courant et la tension alternatifs sont en phase grâce à un facteur de puissance unitaire (figure II. 32 et figure II. 33), avec un THD moins de 5% (figure II. 34) et un facteur de puissance unitaire (figure II. 35).

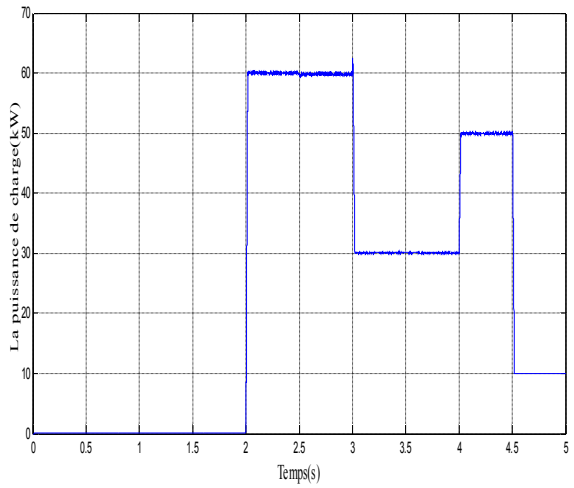



Figure II. 26 Profile de la puissance de charge

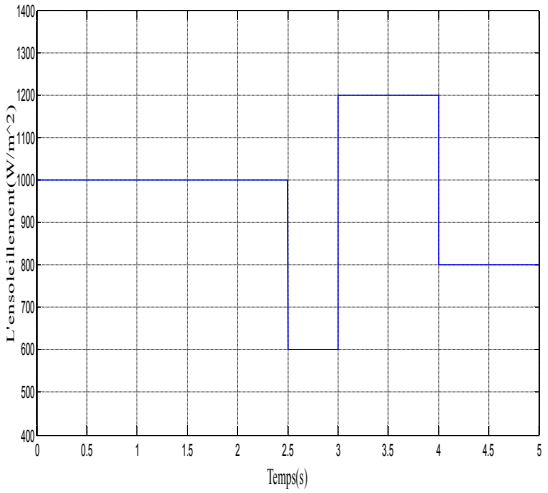



Figure II. 27 Profile de l'ensoleillement

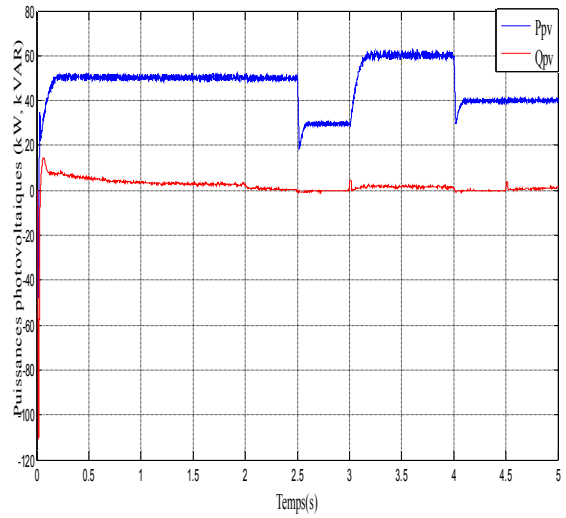



Figure II. 28 Les puissances de l'onduleur

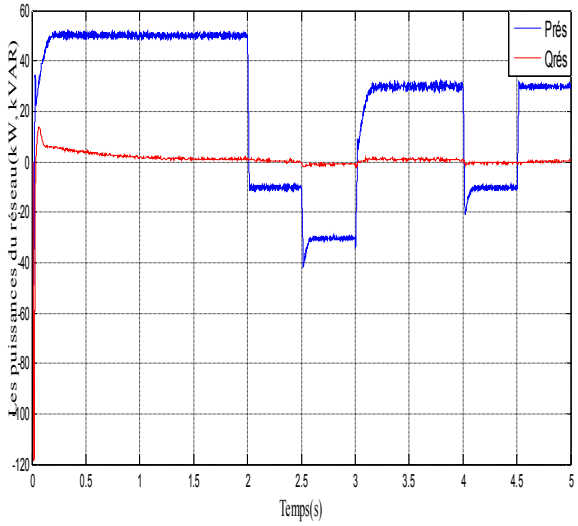



Figure II. 29 Les puissances du réseau

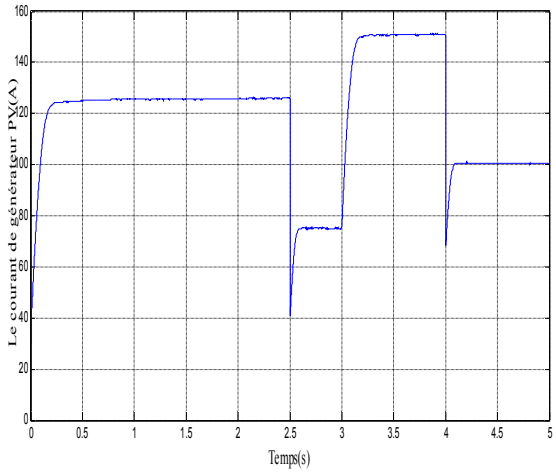



Figure II. 30 Le courant photovoltaïque

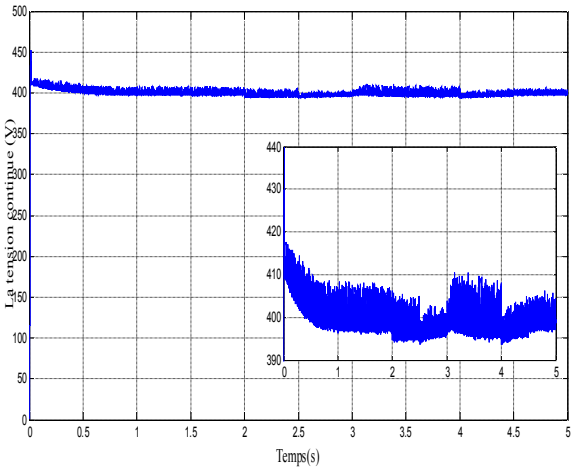



Figure II. 31 La tension continue

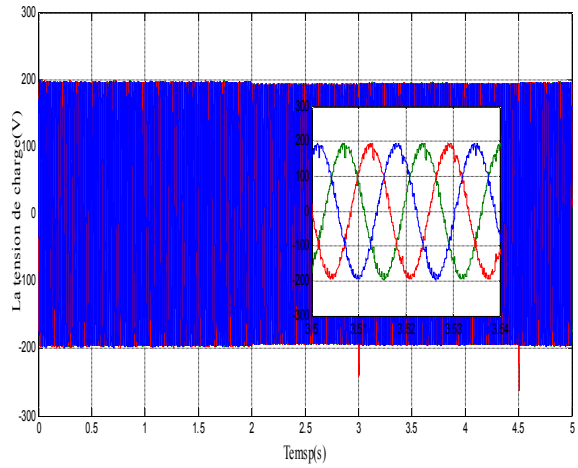



Figure II. 32 La tension de charge

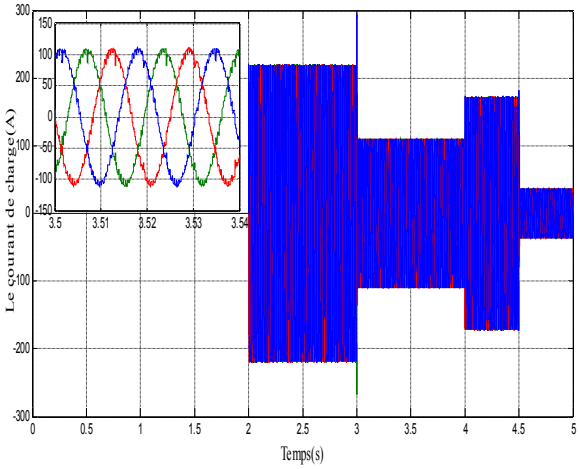



Figure II. 33 Le courant de charge

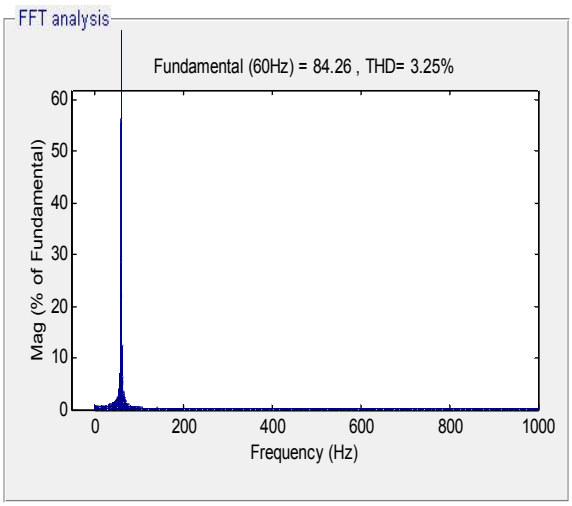



Figure II. 34 Les harmoniques de courant

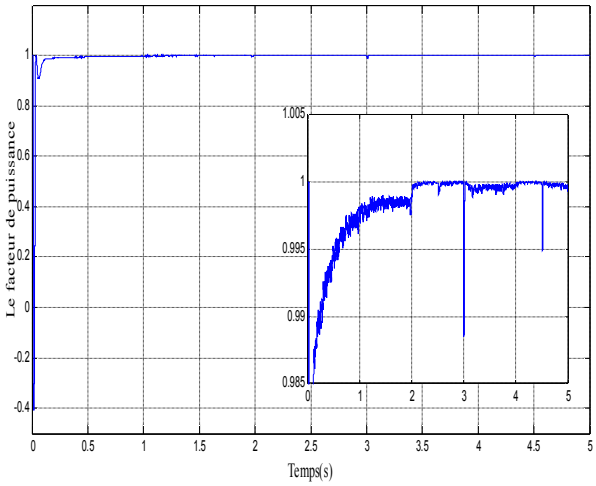



Figure II. 35 Le facteur de puissance de l'onduleur

## II. 9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, les différentes structures d'intégration du système photovoltaïque au réseau électrique et la modélisation mathématiquement de la cellule photovoltaïque avec l'illustration de l'influence de la température et de l'éclairement sur la puissance produite. Ensuite, la modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque et la commande par la logique floue pour suivre le point de puissance maximale sont détaillés. Pour la connexion au réseau électrique, la commande vectorielle est utilisée pour contrôler la puissance active et réactive injectées au réseau. La représentation de résultat de simulation sous MATLAB/simulink subit l'influence de l'éclairement et la variation de charge. Ces résultats montrent l'efficacité de la logique floue à bien suivre la puissance maximale, la stabilité de la tension continue aux

bornes du bus DC et encore l'efficacité de l'onduleur à injecter la puissance active avec un facteur de puissance unitaire. Mais cette puissance photovoltaïque reste intermittente et variable avec les conditions climatiques, ce qui nécessite une autre source d'énergie vienne la compléter pour avoir une qualité d'énergie plus fiable.

# *Chapitre III*

## Modélisation et Simulation de la Chaine de Conversion Eolienne

## III. 1 Introduction

Depuis l'Antiquité, les moulins à vent sont utilisés pour moudre le grain en convertissant l'énergie du vent en énergie mécanique. En 1890, Danois Poul La Cour a construit La première éolienne industrielle pour produire d'électricité. De nos jours, l'énergie éolienne a connu un grand développement et a attiré l'attention du monde entier pour faire face au problème de la rareté des sources d'énergie traditionnelles.

Face aux risques croissants de l'énergie nucléaire et à la dégradation continue du climat par l'effet de serre, l'énergie éolienne parvient à concilier le développement économique et la préservation de l'environnement. Suivant le fonctionnement désiré, l'éolienne peut être connectée au réseau électrique ou autonome (fonctionnement isolé). Pour la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique, deux types d'éoliennes existent ; les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. Les éoliennes à vitesse variable sont les plus utilisées pour qu'elles permettent de capter le maximum d'énergie au long de la variation du vent. Pour la connexion au réseau électrique de ce type des éoliennes à vitesse variable, l'électronique de puissances joue un rôle très important pour l'adaptation de leurs fréquences variables avec la fréquence du réseau.

Ce chapitre détaille les différents types de l'énergie éolienne et les composants la constituant, la modélisation de la chaine de conversion éolienne avec l'application de la logique floue pour suivre le point de puissance maximale. La simulation d'un parc éolien de 50kW qui constitue de six turbines est présentée avec la connexion au réseau électrique à travers un seul onduleur. Différents profile de vitesse du vent sont appliqués avec la variation de charge pour tester les performances de contrôle appliqué face à ces turbulences.

## III. 2 Définition de l'énergie éolienne

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est crée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [42]. Ce vent est la source de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité à l'aide des systèmes mécaniques et électriques. L'éolienne est un dispositif qui permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation puis en énergie électrique à l'intermédiaire d'une génératrice.

## III. 3 Différents types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: éolienne à axe horizontal et à axe vertical.

### III.3. 1 Les éoliennes à axe vertical

En milieu urbain, la vitesse du vent et sa direction sont imprévisibles, surtout près des bâtiments. Là où la turbulence ne peut être évitée, les éoliennes à axe vertical peuvent plus facilement capter le vent [53].

### III.3. 1. 1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus

Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence [54]. Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile dû aux frottements générés par le poids du rotor qui pèse sur son socle [55].

Figure III. 1 Eolienne darrieus

### III. 3. 1. 2 Eolienne à axe vertical de type Savonius

L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement [53]. Ce type d'éolienne peut démarre à de faibles vitesses du vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus.

Figure III. 2 Eolienne Savonius

### III. 3. 2 Les éoliennes à axe horizontal

Les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion [55]. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [57].

Figure. III. 3 Eolienne à axe horizontal

## III. 4 Taille d'aérogénérateur

Les éoliennes peuvent être classées en deux catégories : les macro-éoliennes utilisées pour la production d'énergie à grande échelle et les micro-éoliennes utilisées pour la production locale d'électricité. De façon générale les paramètres de production de puissance des éoliennes varient selon la puissance de l'éolienne et le diamètre de ses pales [57]. La

Figure (III.4) présente une illustration de la taille des éoliennes en fonction de la puissance produite par celles-ci.

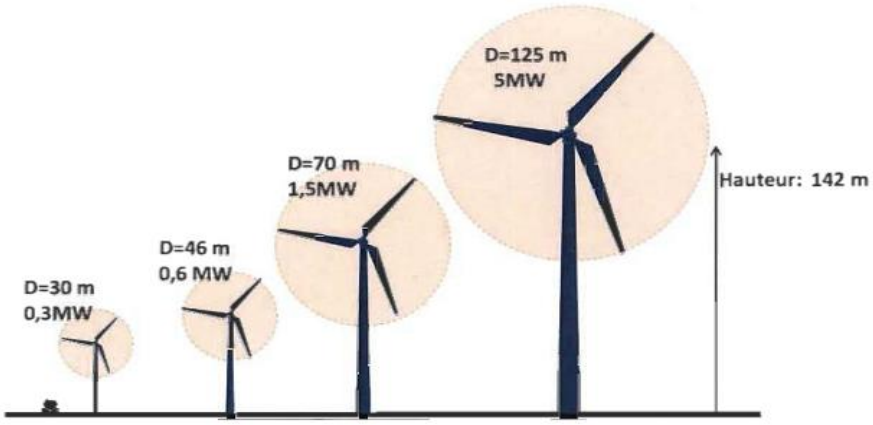



Figure III. 4 Puissances en fonction du diamètre de l'éolienne

## III. 5 Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et le mât:

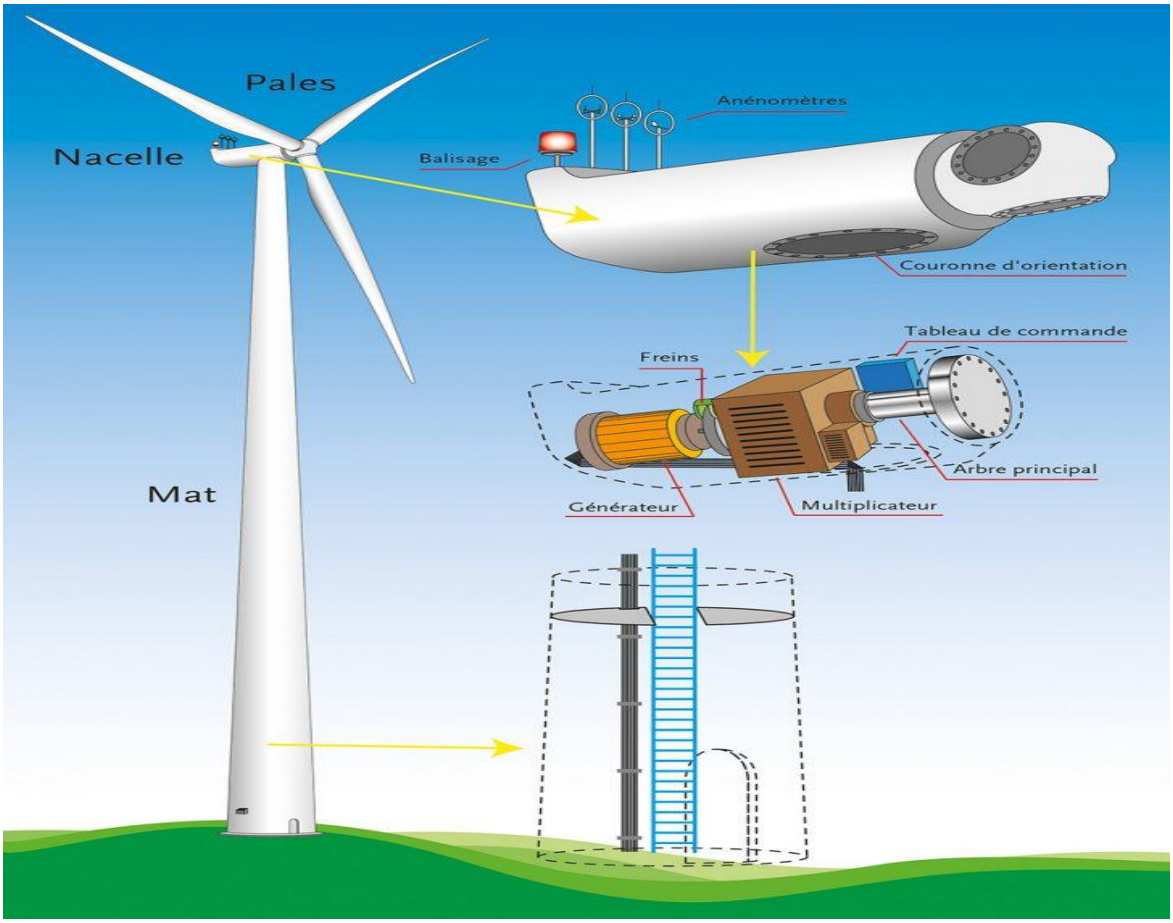



Figure III. 5 Composants d'une éolienne

### III. 5. 1 Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Le fonctionnement de ces pales affecte largement la disponibilité de l'énergie éolienne. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement des pales (pas des pales variables, freinage du rotor…).

### III. 5. 2 Nacelle

Son rôle est de regrouper tous les éléments mécaniques qui couplent le rotor au générateur électrique comme :

- ✓ Multiplicateur de vitesse ; c'est un élévateur de vitesse, raccordé entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraine la génératrice électrique. Des problèmes de vibrations, de bruit et de coûts de maintenance sont liés à la présence de ces multiplicateurs [56].
- ✓ Contrôleur électronique ; qui assure le bon fonctionnement l'éolienne ou l'arrête total en cas de défaillance.
- ✓ Divers dispositifs de refroidissement : ce compose d'un ventilateur pour refroidir la génératrice.
- ✓ Dispositif d'orientation des pales ; qui sert à la régulation de la puissance éolienne et la sécurité d'éolienne face au vent fort.
- ✓ Génératrice électrique : c'est l'élément essentiel qui assure la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

### III. 5 .3 Mât

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent pas, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante pour atteindre la vitesse idéale du vent, améliorant le captage de l'énergie.

## III. 6 La Conversion Electromécanique

En fonction du type de régénérateur utilisé, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens :

- système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (*S.E.I.G.*)
- système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (*D.F.I.G.* ou *GADA*)
- système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants

### III.6.1 Les Éoliennes à vitesse fixe

L'éolienne à vitesse fixe était auparavant le système d'éolienne le plus couramment utilisé. Cela dépend du fait qu'elle a une conception très robuste avec peu de composants [58]. Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend du design de la turbine elle-même et de la fréquence du réseau électrique [59]. Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Ces éoliennes munis d'un système d'orientation de pales (pitch control) permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance [60]. La nécessité d'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne pour avoir une vitesse de rotation supérieure à la vitesse du synchronisme [61]. Egalement un banc de condensateurs est installé pour satisfaire la puissance réactive de génératrice.

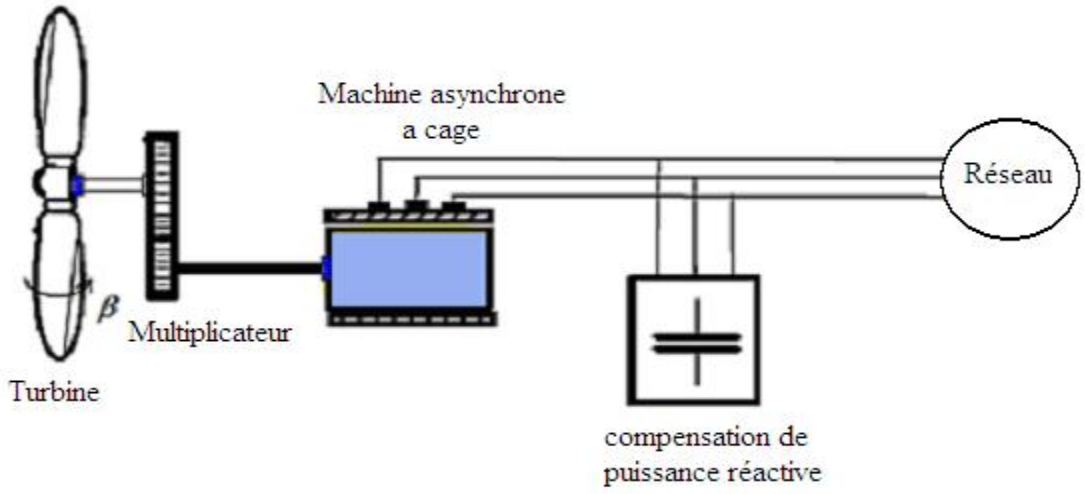



Figure III. 6 Système éolienne basé sur une machine à vitesse fixe

### III.6. 2 Les éoliennes à vitesse variables

Les éoliennes à vitesse variable ont démontré qu'elles peuvent capturer 8-15 % plus de puissance que les machines à vitesse constante [62]. Dans ce type de fonctionnement, la vitesse de rotation change en fonction de la vitesse du vent pour optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne. Cela permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes par l'extraction en permanence de la puissance maximale dans les différentes conditions de vent. Les éoliennes à vitesse variable utilisent de l'électronique de puissance pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne qui sera adaptée à la vitesse du vent afin d'optimiser la puissance fournie au réseau [63].

### III. 6. 2. 1 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

L'utilisation du générateur à asynchrone double alimentation (GADA) a énormément augmenté en raison de sa maintenance facile, de sa bonne fiabilité, de son faible coût et de sa construction simple [64]. Le stator du générateur est directement connecté au réseau, tandis que le rotor est intégré au réseau via un convertisseur back-to-back [65]. Au niveau de ce convertisseur, les différents contrôles nécessaires pour maximiser la puissance éolienne peuvent être appliqués en régulant la vitesse de rotation de la GADA et en contrôlant l'angle de pas des pales. Ensuite, le contrôle des puissances actives et réactives injectées dans le réseau électrique peut être établi pour garantir un facteur de puissance unitaire. Au total, la puissance nominale du convertisseur électronique de puissance ne représente que 25 à 30% de la capacité du générateur [66].

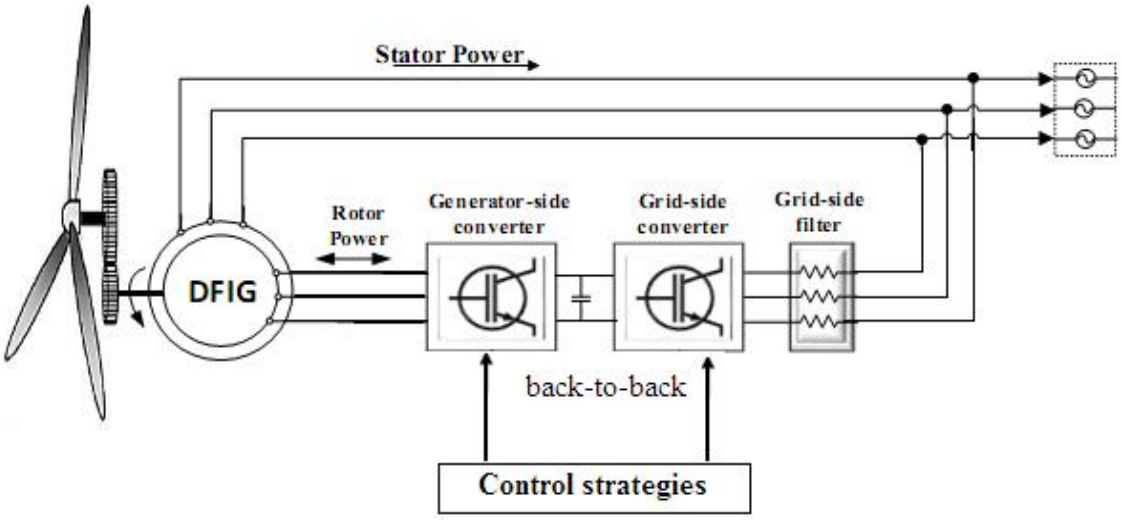



Figure III. 7 La chaine de conversion éolienne à la base de GADA

### III. 6. 2. 2 Génératrice synchrone à aimant permanant (GSAP)

En raison de sa structure simple, de sa disponibilité, de sa fiabilité et de sa capacité efficace de production d'énergie, l'éolienne à base de PMSG est généralement préférée [67]. Les avantages de cette configuration comprennent l'élimination de l'excitation en courant continu, une moindre exigence de réparation et un rapport puissance/poids élevé [68]. La machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement [69]. 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 bagues et balais pour les génératrices à aimants [54]. Les différentes topologies de GSAP sont présentées à la Figure III.8.

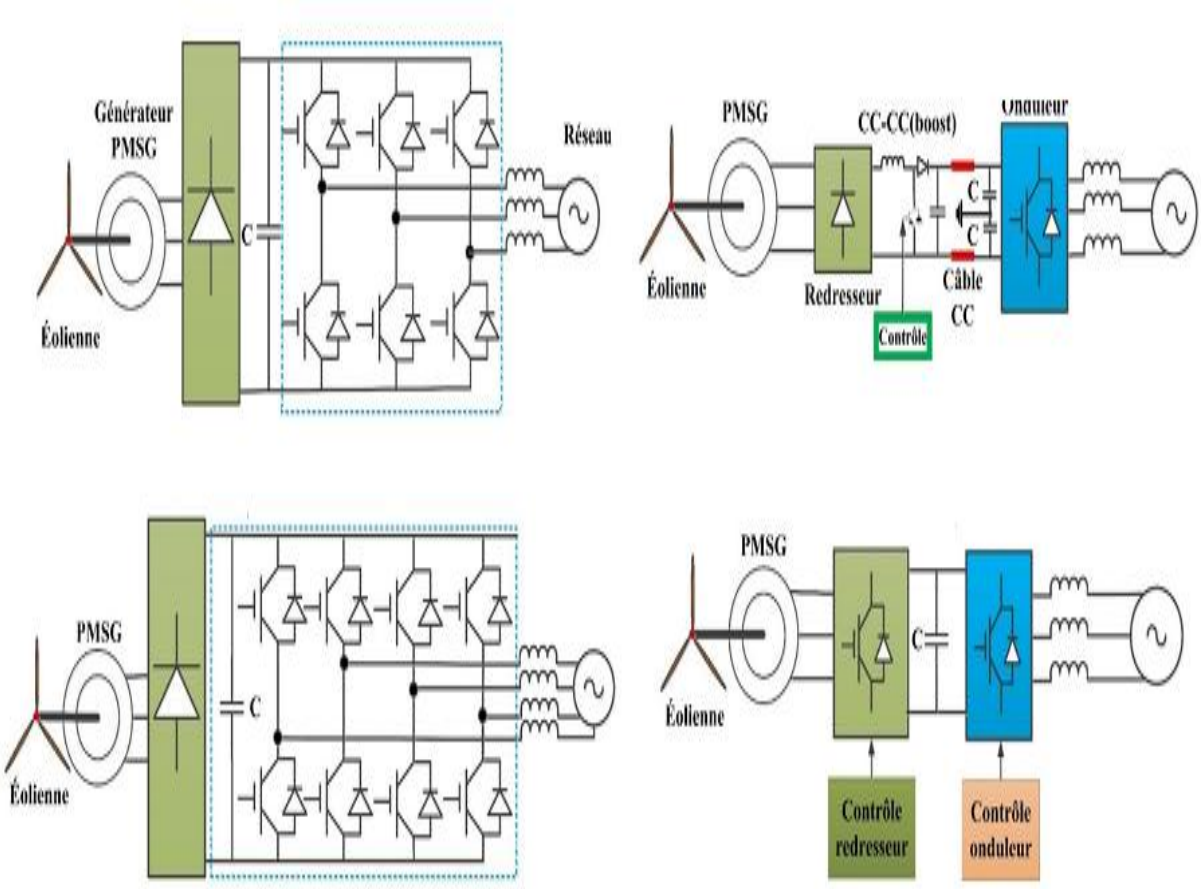



Figure III. 8 Les différentes topologies de la chaine de conversion éolienne à la base de GSAP [21]

Les avantages et les inconvénients de chaque machine sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 1 Avantages et inconvénient de différentes éoliennes [70]

| Type d'éolienne | avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| MAS<br>Vitesse fixe | - Machine robuste<br>- Faible coût<br>- Pad d'électronique de puissance | - Puissance extraite non optimisé<br>- Maintenance de boit de vitesse<br>- Pas de contrôle de l'énergie réactive<br>- Magnétisation de la machine imposée par le réseau |
| GADA<br>Vitesse variable | - Fonctionnement à vitesse variable<br>- Puissance extraite non optimisé<br>Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale<br>- Machine standard<br>- Connexion de la machine plus facile à gérer<br>- Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau | - Maintenance de boit de vitesse<br>- Prix de l'électronique de puissance<br>- Contrôle, Commande complexe<br>- Control glissant bagues - balais |
| GSAP<br>Vitesse variable | - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse<br>- Puissance extraite non optimisé pour les vents faibles<br>Connexion de la machine plus facile à gérer<br>- Possibilité d'absence de la boite de vitesse | - Prix de l'électronique de puissance<br>- Machine spécifique<br>- Grande diamètre de machine<br>- Electronique de puissance dimensionné pour la puissance normale da la génératrice |

## III. 8 Les modes d'exploitation de parc éolien

En raison des contraintes technologiques, la taille des systèmes individuels de conversion de l'énergie éolienne est encore limitée. Par conséquent, un parc éolien est composé de plusieurs individuelles éoliennes connectées en série et en parallèle, qui fonctionnent simultanément pour augmenter la puissance produite. Il existe de nombreuses topologies de connexion des éoliennes, la première étant de connecter les éoliennes au même convertisseur DC/DC. L'inconvénient de cette approche est que si toutes les éoliennes sont connectées au même convertisseur DC/DC, elles tournent toutes à la même vitesse de rotation même si elles

ne soient pas soumises à la même vitesse du vent. L'éolienne ne peut donc pas atteindre son rendement optimal. La seconde est la connexion de chaque turbine à un convertisseur DC/DC individuel. Cette topologie est la plus efficace pour donner plus de puissance à chaque variation de la vitesse du vent. Cependant, le coût total sera plus élevé. La troisième topologie consiste à connecter un certain nombre de turbines au même convertisseur DC/DC, par exemple quatre turbines à un convertisseur DC/DC commun. Les quatre turbines fonctionneront à la même vitesse opérationnelle alors que la vitesse du vent peut varier entre ces quatre turbines, ce qui peut diminuer l'efficacité aérodynamique totale par rapport au convertisseur DC/DC individuel pour chaque turbine. L'onduleur encore peut entre individuel ou central. Selon la zone d'installation, il existe deux types de parc éolien ; le parc onshore et le parc offshore.

### III. 8. 1 Les éoliennes onshore

Une éolienne terrestre, ou onshore, est par définition installée sur la terre ferme. Les éoliennes terrestres sont moins coûteuses à installer et plus faciles à entretenir que les éoliennes offshore, qui doivent répondre à des défis techniques plus importants liés aux conditions du milieu marin [13].

Figure III. 9 Parc d'éolien onshore

### III. 8. 2 Les éoliennes offshores

Éoliennes situées dans le plan d'eau. Aujourd'hui, il y a un grand intérêt à placer des éoliennes offshore dans de grands parcs éoliens. Bien que les éoliennes offshore puissent produire deux fois plus d'électricité que les éoliennes terrestre, leur construction reste un défi

majeur. La mise en place de projets éoliens en mer a favorisé l'émergence de nouvelles demandes, parmi lesquelles la nécessité de disposer de fondations plus solides, de câbles sous-marins de grande longueur et d'aérogénérateur de puissance unitaire plus élevée [71]. Cependant, les éoliennes offshores ont une durée de vie plus longue que les éoliennes terrestres. La raison en est que la faible turbulence en mer donne des charges de fatigue plus faibles sur l'éolienne [72]. Les éoliennes marines profitent d'un vent plus fort et plus régulier, elles fonctionnent pleine charge 45% du temps [73].

Figure III. 10 Parc d'éolien offchore

## III. 7 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

La puissance captée par les éoliennes fluctue en raison de la nature variable inhérente de la vitesse du vent [74]. Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance produite. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale $P_n$ qui est obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent $V_n$ [75]. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à $V_n$ la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale $V_n$, on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage,$V_d$ à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent $V_M$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses $V_n$, $V_d$ et $V_M$ définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure (III.11)) :

- la zone I, où P = 0, la turbine ne fonctionne pas, car la vitesse de vent est très faible pour provoquer la rotation des pales.
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent *V*.
- la zone III, la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts [76].
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

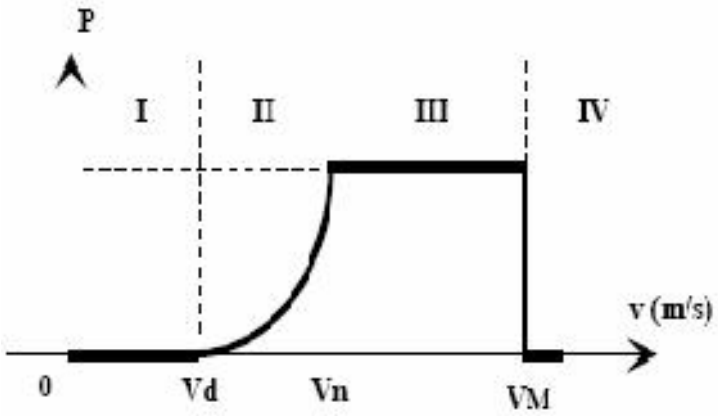



Figure III. 11 Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

Le système d'orientation des pales « pitch control » est un dispositif qui tourne les pales autour des axes longitudinaux pour limiter la puissance générée. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifiant les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de la puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses du vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance [77]. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire [78].

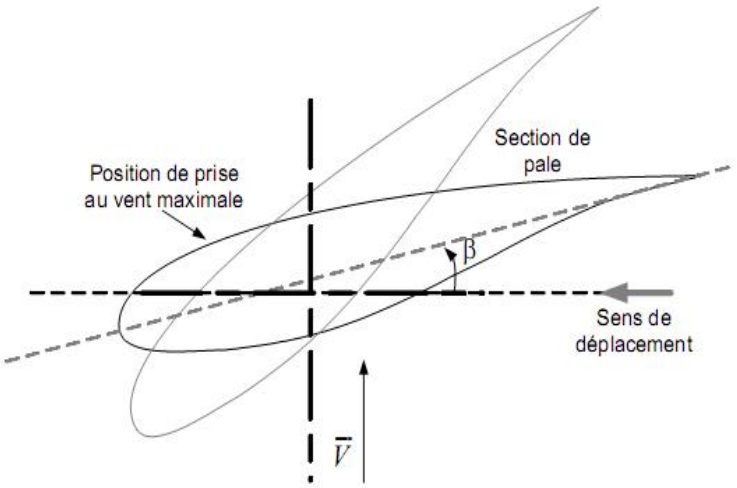



Figure III. 12 Le réglage par l'ongle de calage

Le système de contrôle du pas est utilisé pour déplacer l'angle des pales afin d'obtenir le $C_p$ maximum pour chaque vitesse du vent. Normalement, le mécanisme de pas est alimenté par un entraînement hydraulique ou électrique [79]. Pour l'entraînement électrique, un moteur électrique est placé pour faire tourner les pales autour son axis à l'aide d'un contrôleur de pas de calage.

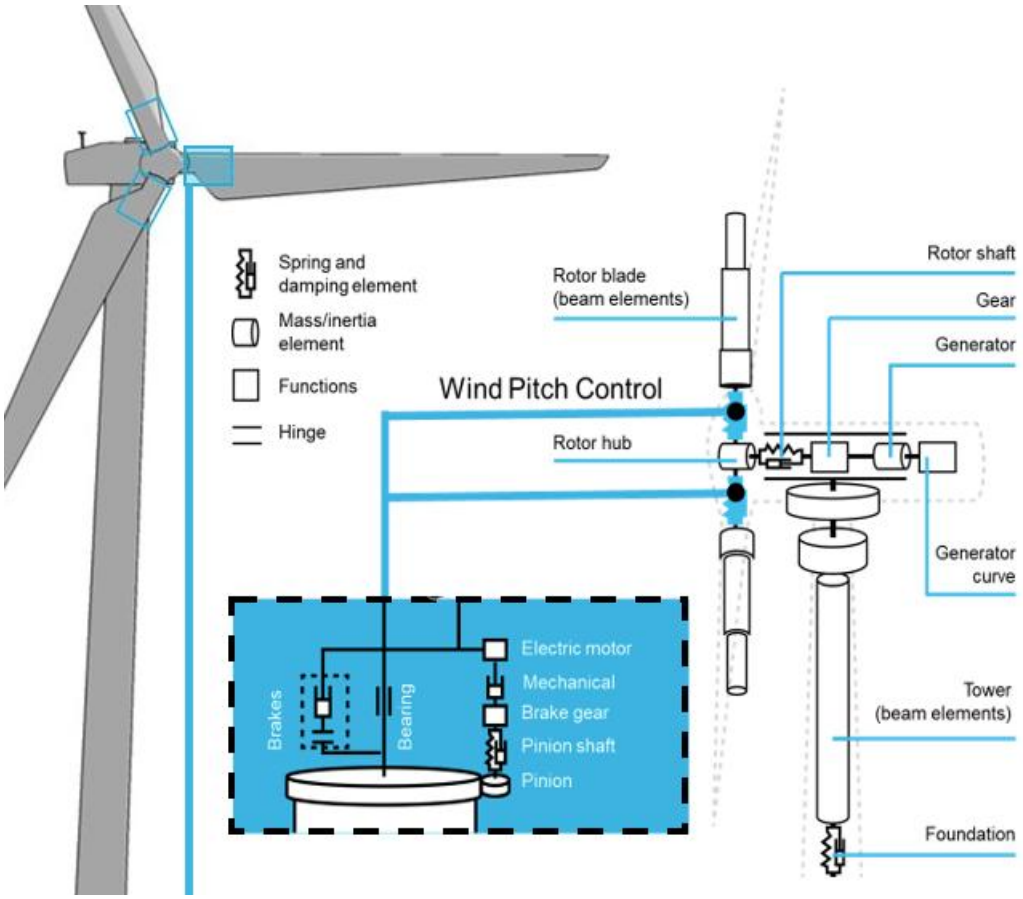



Figure III. 13 Moteur électrique pour le control de pas

## III.9 Modélisation d'une chaine de conversion éolienne

La figure III. 14 représente la chaine de conversion éolienne utilisée dans ce chapitre, dont le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable est couplée directement sans multiplicateur au rotor de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP). Le stator de GSAP est raccordé à un redresseur à diode pour transformer la tension triphasée à une tension continue adaptable à l'entre d'un hacheur IGBT commandé par la logique floue pour suivre la puissance maximale de l'éolienne. Ce dernier est connecté au réseau à travers un onduleur contrôlé par la commande vectorielle pour gérer l'échange des puissances entre le éolien et le réseau électrique.

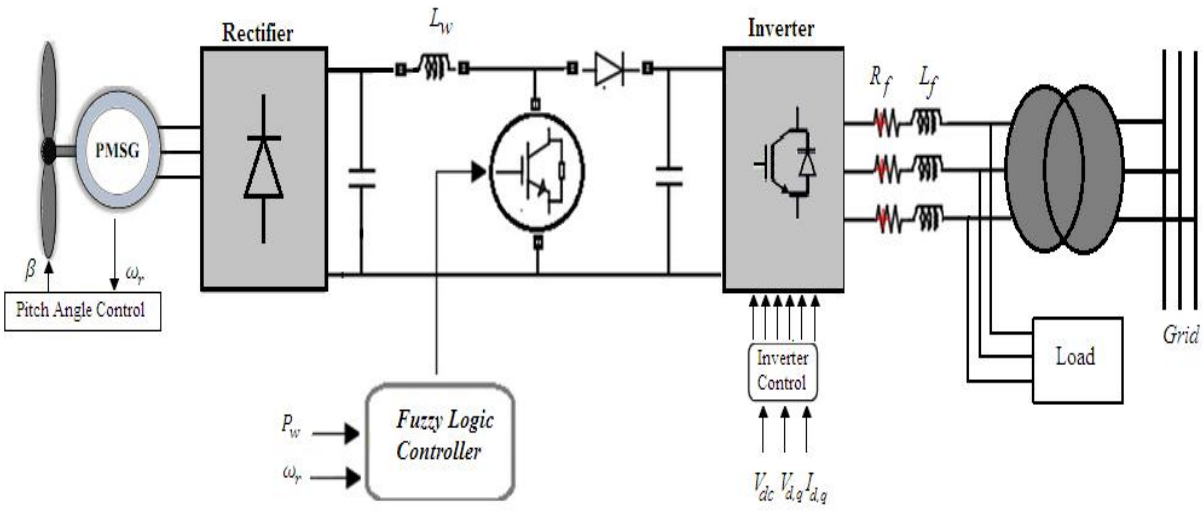



Figure III. 14 Chaine de conversion éolienne

Dans les éoliennes à vitesse variable, la puissance produite varie avec la variation du vent. Donc la puissance produite à la sortie de la génératrice GSAP est à fréquence variable qui nécessite d'une interface d'électronique de puissance pour la séparer à celle de réseau électrique. Les convertisseurs électriques dans la chaine de conversion éolienne jouent un rôle essentiel pour la maximisation de l'énergie, le control de puissances injectées au réseau électrique et le bon fonctionnement du système global pour donner un meilleur rendement.

Dans notre configuration on utilise un redresseur connecté à un onduleur à l'intermédiaire d'un hacheur commandé. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking 'MPPT') [53]. L'onduleur contrôle la puissance active et réactive injecté au réseau électrique. Ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des éoliennes.

### III. 9. 1 Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot v^3{}_{vent} \qquad \text{(III.1)}$$

$S$ : est la surface traversée par le vent ($S = \pi R^2$), R est le rayon des pâles de l'éolienne

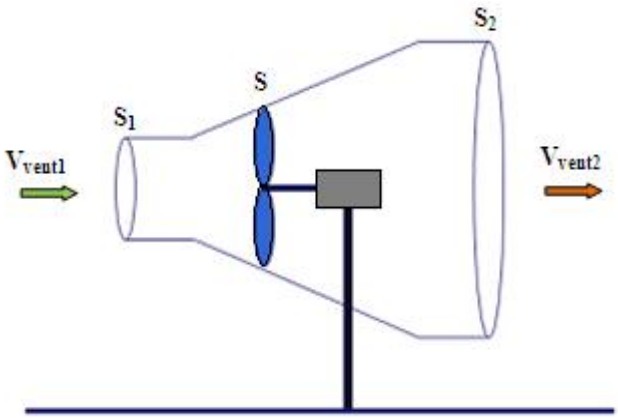



Figure III. 15 Tube de courant auteur d'un éolien

Le théorème du physicien allemand 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.

$$P_{\max_eol} = \frac{16}{27} P_{vent} = 0.59 P_{vent} \tag{III.2}$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale récupérable par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de vent. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_P^{opt} = \frac{P_{\max_eol}}{P_{vent}} = \frac{2 \cdot P_{\max_eol}}{\rho \cdot S \cdot v_{vent}^3} = 0.59 \tag{III.3}$$

Ce rendement, appelé coefficient de puissance $C_p$ de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par :

$$C_P = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot v_{vent}^3} \tag{III.4}$$

Le coefficient de puissance est calculé par cette formule [80]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \tag{III.5}$$

Où :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{III.6}$$

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

La vitesse réduite (spécifique) $\lambda$ qui est le rapport de la vitesse angulaire de rotation des pâles et de la vitesse du vent est donnée par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{v_{went}} \tag{III.7}$$

La puissance éolienne est calculée ainsi [81]:

$$P_{eol} = C_p(\lambda, \beta) P_{vent} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta).\rho.\pi.R^2 \cdot v_{vent}^3 \tag{III.8}$$

Le couple aérodynamique est donné par l'expression suivante :

$$T_{aer} = \frac{P_{eol}}{\omega_r} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta).\rho.\pi.R^2 \cdot v_{vent}^2 \tag{III.9}$$

La figure suivante présente l'allure de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation en variant la vitesse vent. La puissance éolienne varie frottement avec la variation de vitesse du vent. Il 'y a toujours un point de puissance maximale qui donne une puissance optimale à chaque valeur du vent. Ce point est dépend d'une valeur optimale de coefficient de puissance et de l'angle de calage des pales β.

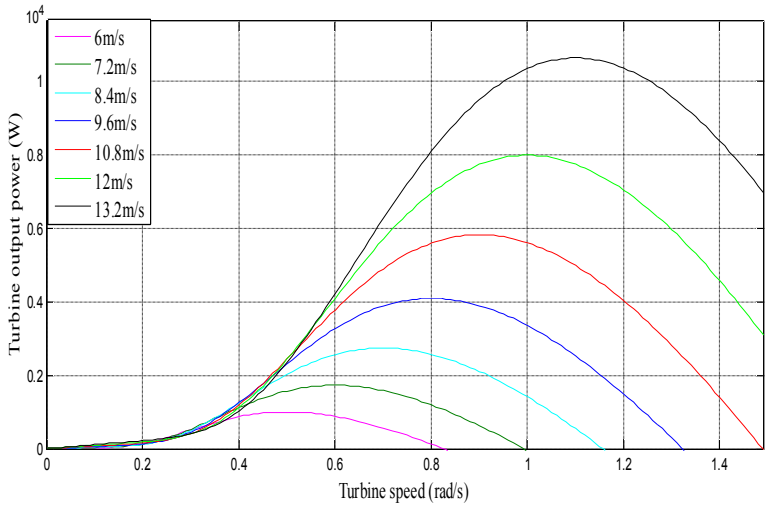



Figure III. 16 La puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation

Le coefficient de puissance dépend fortement de l'angle β, dont la variation modifie progressivement la valeur de $C_p$. Par conséquent, la puissance aérodynamique évolue car elle a une relation linéaire avec celle-ci comme il est montré dans la figure III. 17. Ce coefficient est optimal pour une valeur de β égale à zéro. L'augmentation de β diminue le coefficient de puissance ce que diminue encore la puissance éolienne produite.

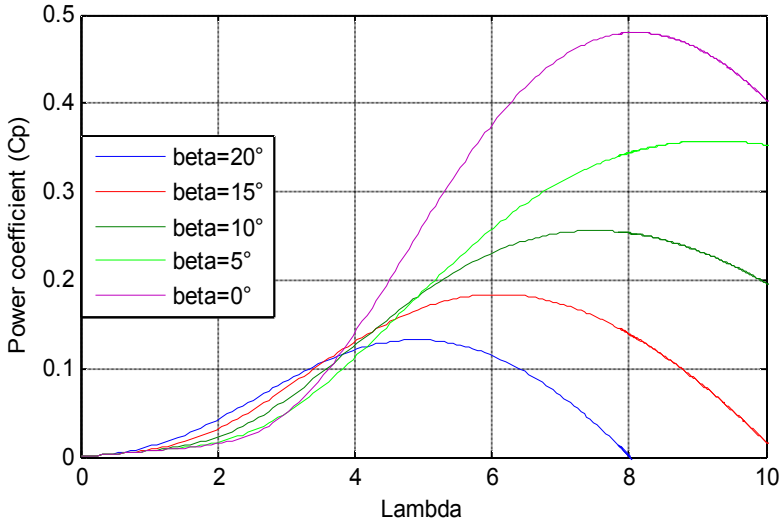



Figure III. 17 Courbes caractéristiques Cp (λ) pour plusieurs valeurs de β

### III. 9. 2 Modélisation de l'arbre de la machine

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [82]:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_{aer} - T_{em} - T_d) \qquad \text{(III.10)}$$

Où J est le moment d'inertie totale de la turbine et du générateur, $T_{aer}$ est le couple aérodynamique ($T_{aer} = P_t/\omega_r$). $T_d = k_r\omega_r$, $k_r$ est le coefficient de frottement visqueux du GSAP.

Le schéma suivant représente le modèle de la turbine éolienne utilisé dans ce travail ;

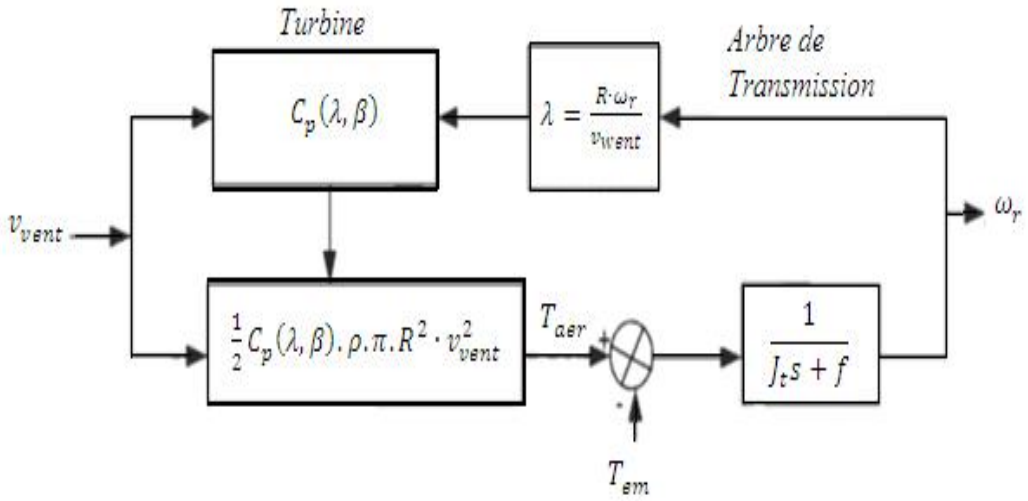



Figure III. 18 Schéma block de la turbine

### III. 9. 3 Modèle de la Génératrice synchrone à aiment permanent

La génératrice synchrone à aiment permanant (GSAP) peut être représenté schématiquement par trois enroulements (a, b, c) au stator et un aimant permanent au rotor. L'alimentation des enroulements statorique donne naissance à une force magnétomotrice tournante à la vitesse angulaire $\omega_r$, le rotor ou la roue polaire à aimants permanents dont le nombre de pôles est égal à celui du stator permet de produire la force magnétomotrice d'excitation [83].

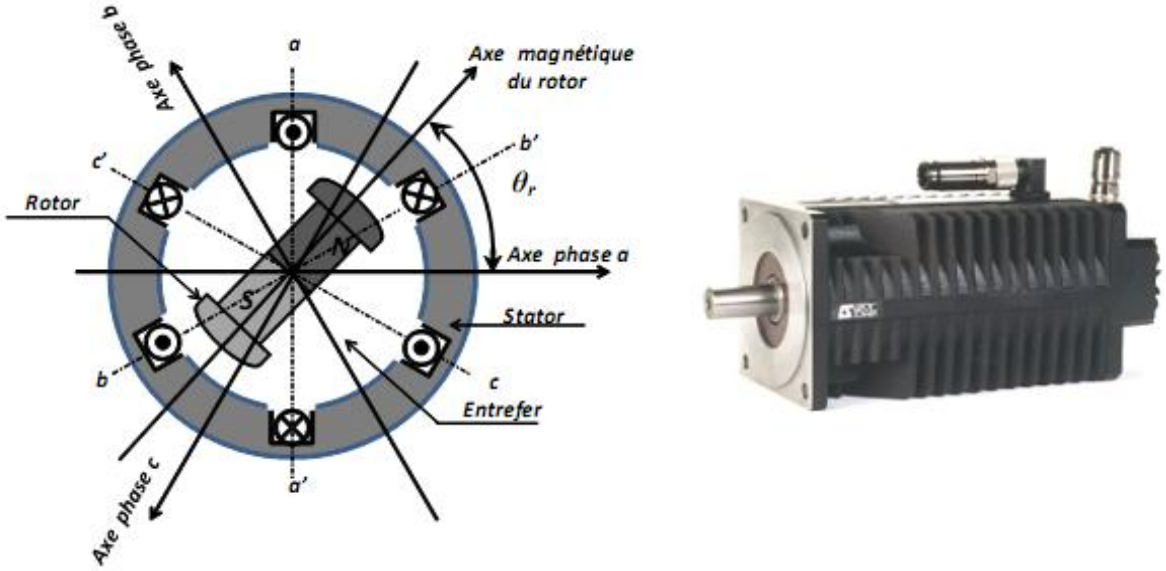



Figure III. 19 Représentation de la génératrice synchrone a aiment permanant GSAP

Les équations électriques de la machine électrique dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.11)}$$

$V_{sa}$, $V_{sb}$, $V_{sc}$ les tentions statorique, $I_{sa}$, $I_{sb}$, $I_{sc}$ les courants statorique, $\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$ les flux statorique, $R_s$ résistance statorique.

Pour simplifier le modèle de GSAP, on passe de la représentation dans le repère (a, b, c) vers une représentation dans le repère cartésien (d, q) appelé encore transformation de PARCK comme il est montré dans la figure suivante :

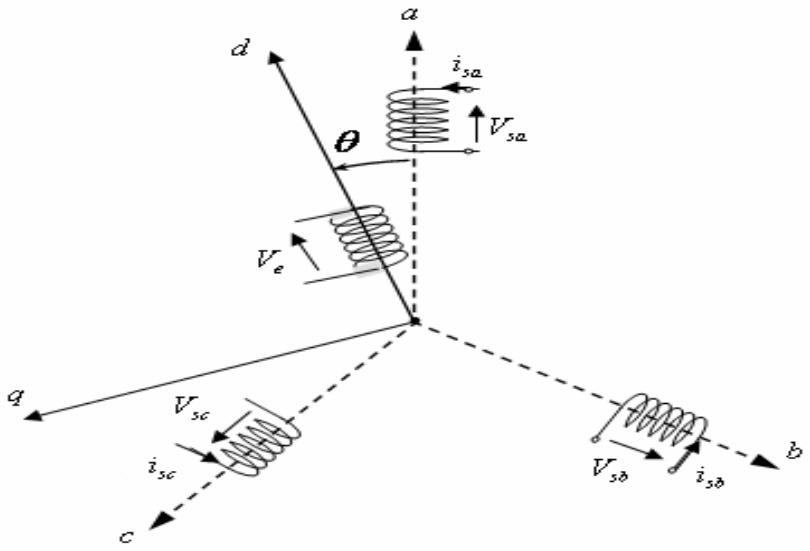



Figure III. 20 Structure de la génératrice synchrone

On peut passer de repère triphasé (a, b, c) vers le repère de PARCK à l'aide d'une matrices de passage $[P(\theta)]$, cette matrice est donnée par l'équation (III.13) :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.12)}$$

Les équations de tensions et de courants dans le repère de PARCK sont données par :

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][V_{sabc}] \quad \text{(III.13)}$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)][I_{sabc}] \quad \text{(III.14)}$$

Après l'application de la transformation de PARCK, les équations de tensions sont les suivantes:

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}\emptyset_{sd} - \omega_e \emptyset_{sq} \quad \text{(III.15)}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}\emptyset_{sq} - \omega_e \emptyset_{sd} \quad \text{(III.16)}$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale, les conducteurs $\emptyset_{sd}$et $\emptyset_{sq}$sont fonctions linéaires des courants $I_{sd}$et $I_{sq}$ :

$$\emptyset_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \emptyset_f \quad \text{(III.17)}$$

$$\emptyset_{sq} = L_{sq} I_{sq} \quad \text{(III.18)}$$

Ou: $\emptyset_f$ représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct, $\omega_e$ est la vitesse électrique du génératrice ($\omega_e = p\omega_r$), p est le nombre des pôles et $\omega_r$ la vitesse de la turbine.

On remplace les équations de flux dans les équations de tensions on obtient les équations de la machine dans le repère de Park suivantes :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{d}{dt} I_{sd} - \omega_e L_s I_{sq} \quad \text{(III.19)}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + \omega_e L_s I_{sd} + \omega_e \emptyset_f \quad \text{(III.20)}$$

A partir les équations de tensions, on peut extraire les expressions de courants qui sont donnés par les équations suivantes:

$$\frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s}\left(V_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_e L_s I_{sq}\right) \quad \text{(III.21)}$$

$$\frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s}\left(V_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_e L_s I_{sd} - \omega_e \emptyset_f\right) \quad \text{(III.22)}$$

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones est donné par la relation suivante:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p\left(\emptyset_{sd} I_{sq} - \emptyset_{sq} I_{sd}\right) \quad \text{(III.23)}$$

On remplace les flux par leurs équations, on obtient :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p\left[\left(L_{sd} - L_{sq}\right) I_{sd} I_{sq} - \emptyset_f I_{sq}\right] \quad \text{(III.24)}$$

Si l'aimant permanent est monté à la surface du rotor, alors $L_d$ devient égal à Lq [84].

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \emptyset_f I_{sq} \quad \text{(III.25)}$$

### III. 9. 4 Redresseur de diode triphasé

Comme la tension et la fréquence de sortie du générateur ne correspondent pas à celles du réseau, l'unité de conversion AC/DC, côté machine, transforme la tension et le courant de sortie du générateur en valeurs DC, devenant ainsi indépendante de la fréquence [85]. Donc la méthode générale est de redresser la tension de sortie de la génératrice puis on traite cette tension continue avant d'être introduire à l'onduleur. Dans notre travail, on utilise un redresseur de diode triphasé pour redresser la tension de sortie de GSAP. Le schéma de ce redresseur est représenté dans la figure suivante :

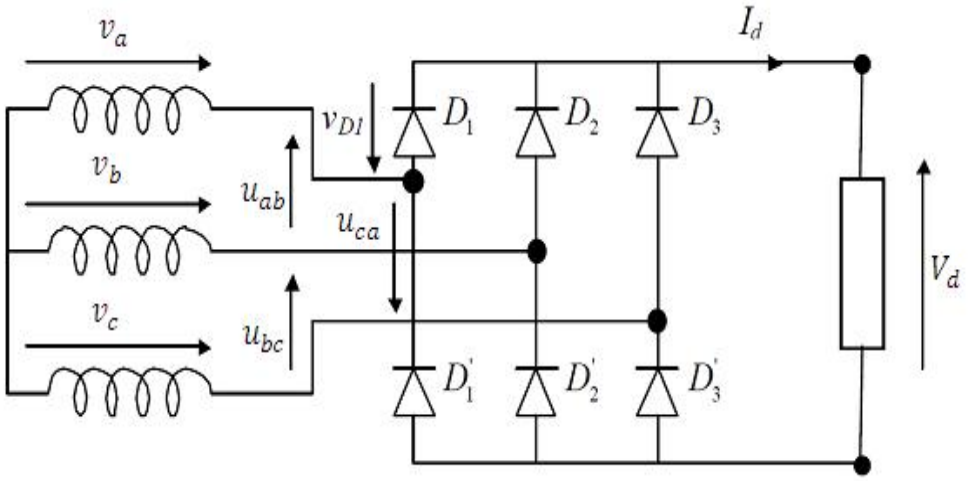



Figure III. 21 Pont de redresseur triphasé

On suppose que les diodes sont idéales, alors ;

Lorsque $v_a > v_b > v_c$ ; $D_1$, $D_3'$ conduisent ; $u_{dc}=v_a-v_c$

Lorsque $v_a > v_c > v_b$ ; $D_1$, $D_2'$ conduisent ; $u_{dc}=v_a-v_b$

Lorsque $v_b > v_a > v_c$ ; $D_2$, $D_3'$ conduisent ; $u_{dc}=v_b-v_c$

Lorsque $v_b > v_c > v_a$ ; $D_2$, $D_1'$ conduisent ; $u_{dc}=v_b-v_a$

Lorsque $v_c > v_a > v_b$ ; $D_3$, $D_2'$ conduisent ; $u_{dc}=v_c-v_b$

Lorsque $v_c > v_b > v_a$ ; $D_3$, $D_1'$ conduisent ; $u_{dc}=v_c-v_a$

Si on suppose que le redressement se fait dans une période de $T/6$, alors les valeurs moyennes de la tension et du courant redressés sont donnés par [37]:

$$U_d = \frac{1}{T/6}\int_{-T/12}^{T/12} u_d dt = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{GSAP} \quad \text{(III. 26)}$$

$$I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_{GSAP} \quad \text{(III.27)}$$

Tel que ;

$$u_d = U_s\sqrt{2}\cos(\omega t) \quad \text{(III.28)}$$

Où ; $U_s$ est la valeur efficace des tensions d'entré, $U_{GSAP}, I_{GSAP}$ les valeurs efficaces de la tension et du courant de GSAP.

### III. 9. 5 Hacheur élévateur

Pour extraire la puissance maximale produite par l'éolienne, la commande de l'hacheur est nécessaire. La structure d'un hacheur élévateur est représentée dans la figure (III. 22)

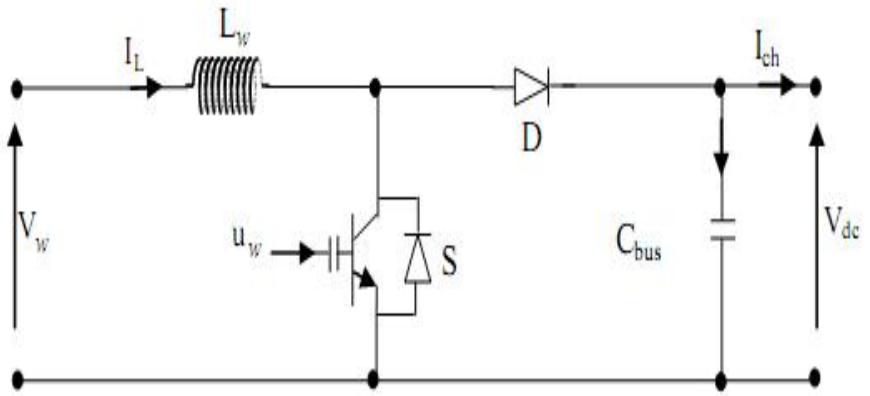



Figure III. 22 Hacheur élévateur

L'équation décrivant ce hacheur élévateur est donné par :

$$\begin{cases} L\frac{dI_{Lw}}{dt} = V_d - Ri_L - (1-u_w)V_{dc} \\ C\frac{dV_{dc}}{dt} = (1-u_w)i_L - \frac{V_{dc}}{R} - I_{dc} \end{cases} \quad \text{( III.29)}$$

### III. 9. 6 Synthèse de la commande MPPT de système éolien

Les chaines de conversion éoliennes ont un faible coût d'installation et sont respectueux de l'environnement mais souffrent d'un faible rendement dû à la variation de la vitesse du vent [86]. L'incertitude et la variation du vent posent également des problèmes aux opérateurs du système [87]. Par conséquent, de nombreuses méthodes MPPT sont utilisées pour faire fonctionner le système à la puissance maximale qui augmente l'efficacité du système éolien.

Le système de commande utilise la relation entre la vitesse de rotation du rotor et la puissance produite pour définir la puissance maximale disponible pour chaque valeur de la vitesse du vent et pour fait évaluer la vitesse du rotor quand on est PMM ($dP_w/d\omega_r = 0$).

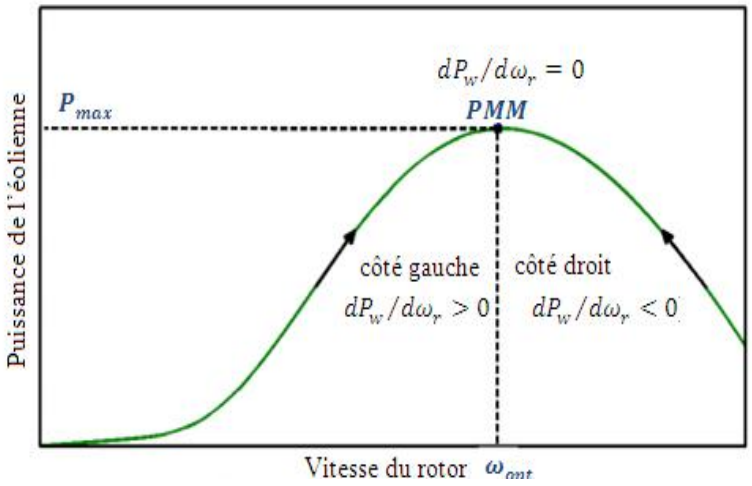



Figure III. 23 Le principe de fonctionnement PMM

Dans le coté gauche l'augmentation de la vitesse du rotor augmente la puissance produite, et dans le coté droite la diminution de vitesse du rotor augmente la puissance produite.

On utilise cette formule $dP_w/d\omega_r$ dans notre régulateur flou comme première entrée de l'erreur ($e_w$) et la deuxième entrée c'est sa dérivée comme il est donné dans les équations suivantes.

$$e_w(k) = \frac{P_w(k)-P_w(k-1)}{\omega_r(k)-\omega_r(k-1)} \quad \text{(III. 30)}$$

$$de_w(k) = e_w(k) - e_w(k-1) \quad \text{(III. 31)}$$

Ce contrôleur ajuste continuellement la vitesse de rotation de la GSAP pour donner une puissance de sortie maximale. Ce contrôleur est représenté dans la figure suivante.

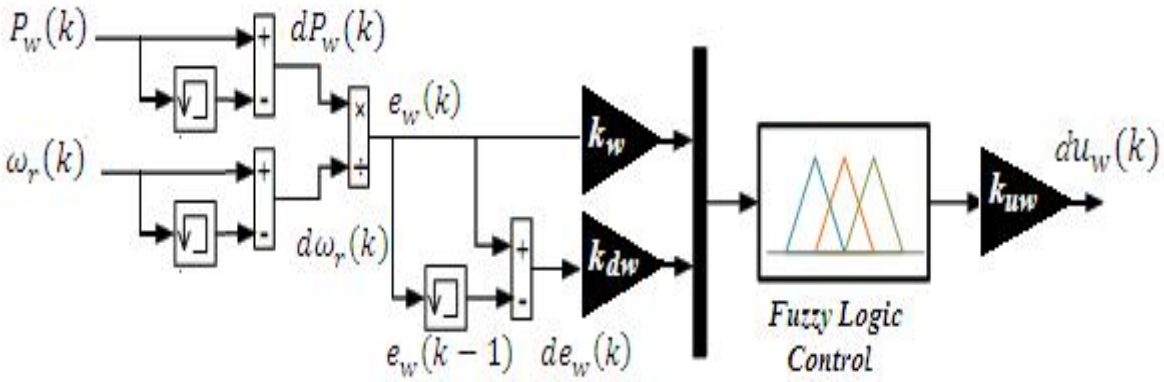



Figure III. 24 Schéma bloc de contrôleur flou

Les fonctions d'appartenance des entres et de la sortie sont présentées à la figure III. 25 et dans le tableau III. 2, les caractères NG, N, ZE, P, PG signifient respectivement Négatif grand, négatif, Zéro, Positif, Positif grand.

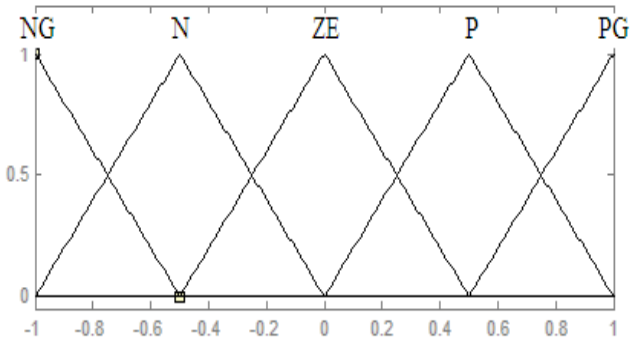



Figure III. 25 Les fonctions d'appartenance de $(\boldsymbol{e_w}, \boldsymbol{de_w}, \boldsymbol{du_w})$

En utilisant une liste d'instructions (les règles) pour relier la sortie $du_w$ aux entrées $e, de$ comme il est détaillé dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 Les règles d'appartenances

| $\Delta u_w$ | | $\Delta e_w$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NG | N | ZE | P | PG |
| $e_w$ | NG | NG | NG | N | N | ZE |
| | N | NG | N | N | ZE | P |
| | ZE | P | N | ZE | P | P |
| | P | N | ZE | N | ZE | ZE |
| | PG | ZE | P | P | PG | PG |

Pour garantir la protection et la sécurité du système éolien et maintenir la puissance à sa valeur nominale, une technique mécanique appelée contrôle de l'angle d'inclinaison est généralement utilisée pour ajuster l'angle de pas des pales en fonction de la vitesse du vent [88]. La technique floue utilisée pour contrôler l'angle du calage est illustrée dans la figure III. 26.

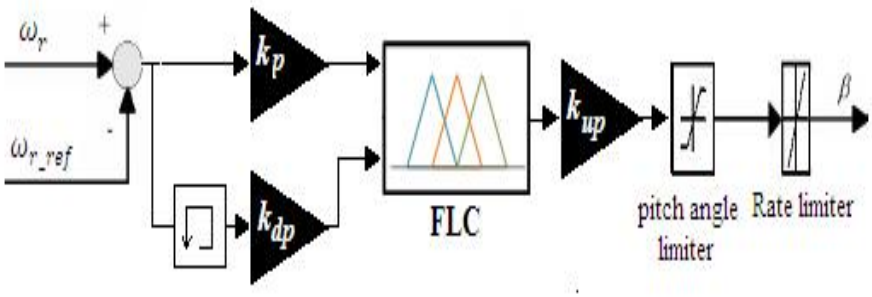



Figure. III. 26 Régulateur flou de l'angle de calage

## III. 10 La simulation d'un parc éolien

Le parc éolien étudié dans ce chapitre est un parc terrestre (onshare), qui contient 6 chaines de conversion éolienne connecté à un bus DC à l'intermédiaire des redresseurs à diode et des hacheurs commandés par la logique floue comme il est détaillé dans la figure (III. 27). Ensuite, toutes les éoliennes sont connectées au réseau électrique via un onduleur commun contrôlé par la commande vectorielle et un filtre RL pour minimiser les harmoniques de courants. Le schéma de simulation de parc éolien est donné dans la figure suivante.

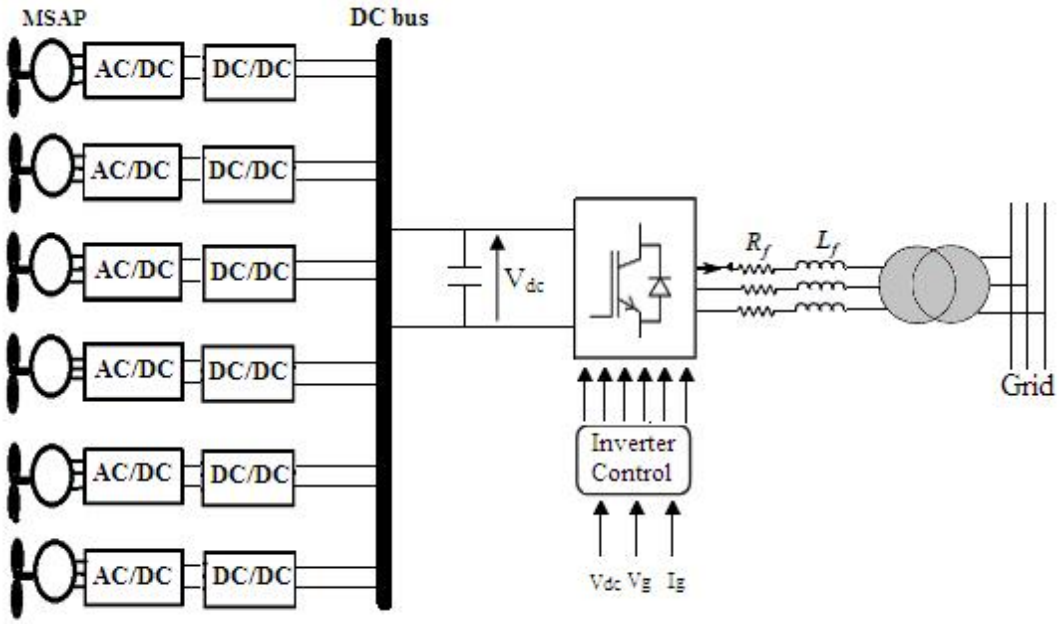



Figure III. 27 Parc éolien terrestre

### III. 11 Résultats de la simulation

La capacité totale de parc éolien est 50kW, où chaque unité a une capacité de 8.5kW. Toutes les unités éoliennes fonctionnent à des vitesses du vent différentes, et le système global est soumis à une seule variation de charge pour tester les performances de chaque unité indépendamment et le parc éolien à ces variations. La variation de la charge est illustrée dans la figure (III. 28) et les vitesses du vent sont représentées dans les figures (III. 29, 31 et 33).

L'utilisation de convertisseurs DC/DC individuel permet à chaque turbine d'avoir une vitesse variable individuelle en fonction de la vitesse du vent disponible à chacune comme il est montré dans la figure III.38. La vitesse de rotation de l'éolienne est proportionnelle à la

vitesse du vent ($\omega_r = (\lambda . V_{vent})/R$) qui justifie la variation de $\omega_r$ avec la variation de la vitesse du vent.

La vitesse du vent varie la vitesse de rotation de la turbine et cette dernière varie la puissance produite d'éolienne. En résulte, la puissance produite varie fortement avec la variation de la vitesse du vent comme il est illustré dans les figure (III. 30, III. 32, III. 34).

La puissance totale de parc éolien est la somme des puissances unitaires, ce qu'explique la variation de cette puissance avec la variation de vitesse du vent comme montre la figure (III. 35). La puissance réactive est nulle qui prouve l'efficacité de notre commande avec un facteur de puissance unitaire (figure III. 41).

La figure (III. 36) présente les puissances de réseau, entre 0s et 2s le parc éolien injecté la puissance produite complètement au réseau électrique (aucune charge n'est connectée). Dans les intervalles [0s-2s] et [4.5s-5s], le parc éolien couvre la puissance de consommateurs et injecte la puissance supplémentaire au réseau. Dans les intervalles [2s-3s] et [4s-4.5s], La puissance de parc est insuffisante à couvrir la demande de charge. Donc, le déficit énergétique est récupéré par le réseau électrique. La puissance réactive est égale à zéro.

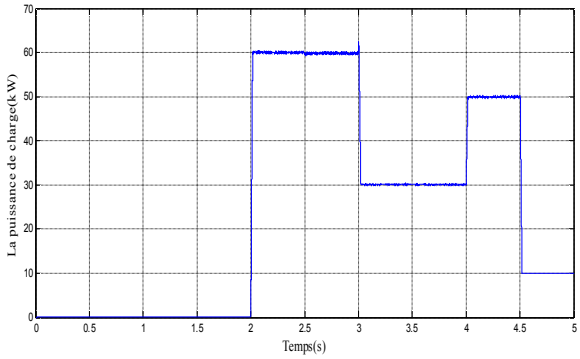
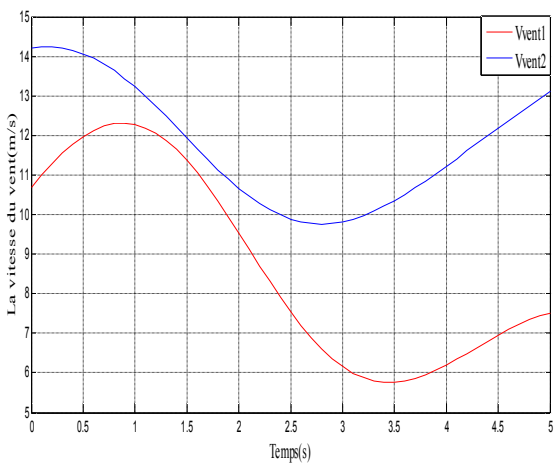



Figure III. 28 La puissance demandée



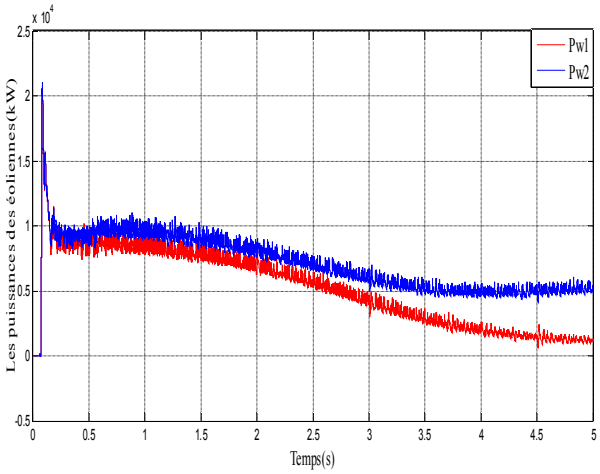




Figure III. 29 Profile du vent des turbines 1, 2 Figure III. 30 Les puissances des turbines 1, 2

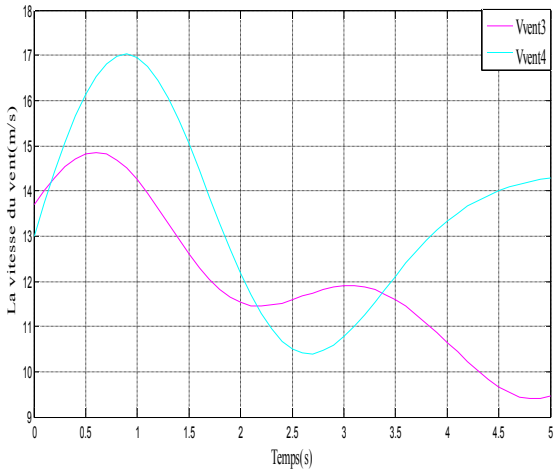



Figure III. 31 Profile du vent des turbines 3, 4

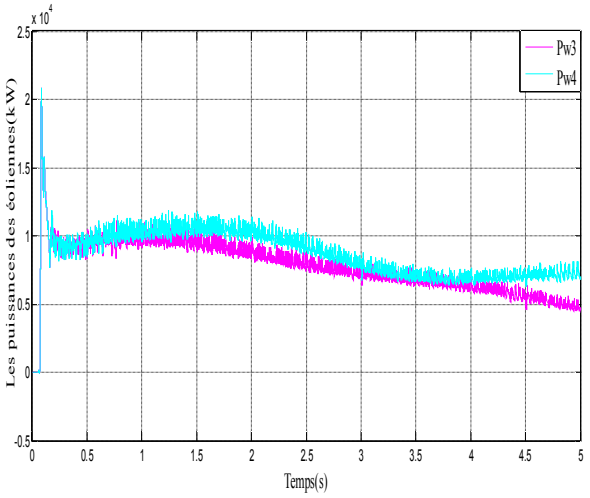



Figure III. 32 Les puissances des turbines 3, 4

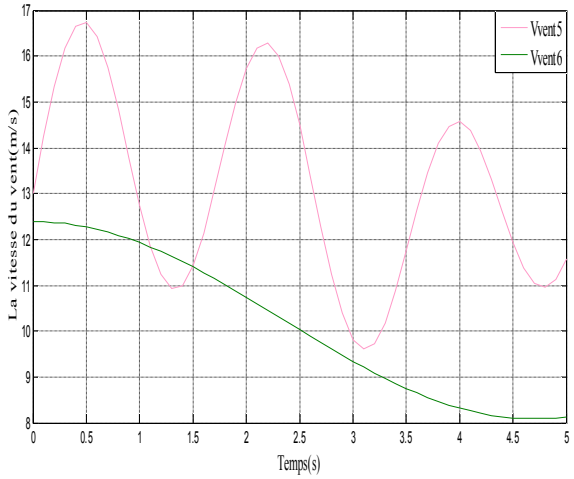



Figure III. 33 Profile du vent des turbines 5, 6

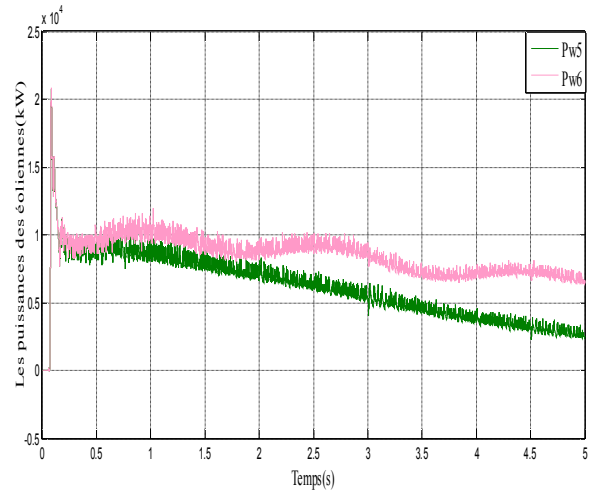



Figure III. 34 Les puissances des turbines 5, 6

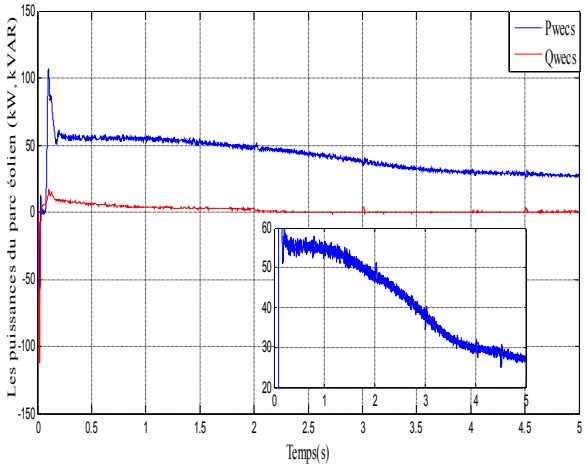



Figure III. 35 Les puissances éoliennes

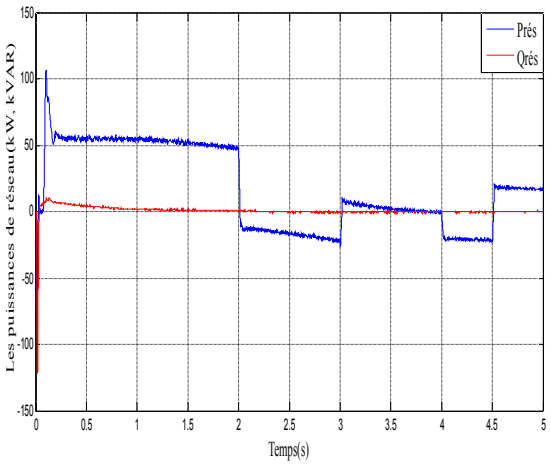



Figure III. 36 Les puissances du réseau

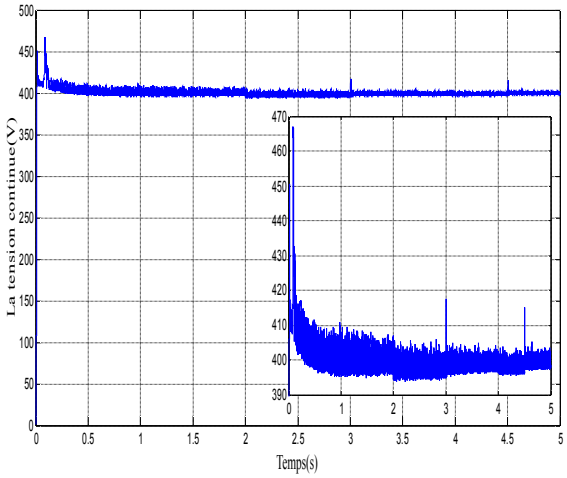



Figure III. 37 La tension continue

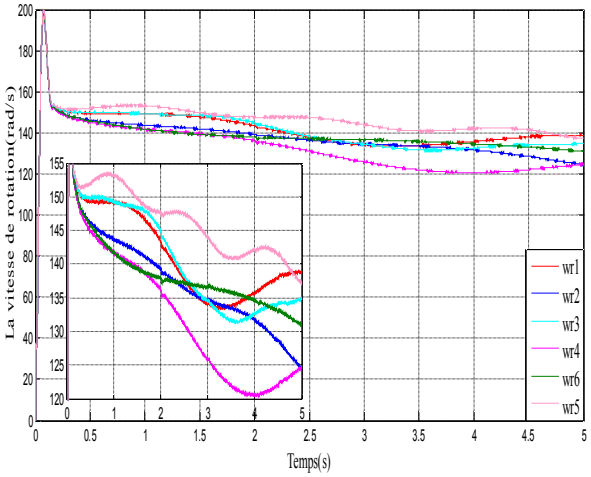



Figure III. 38 Les vitesses de rotations

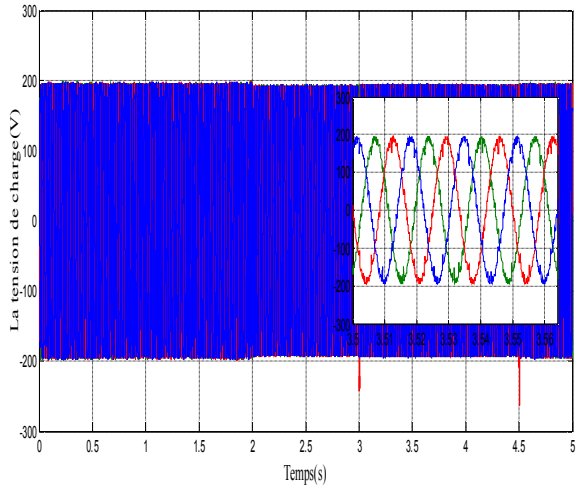



Figure III. 39 La tension de charge

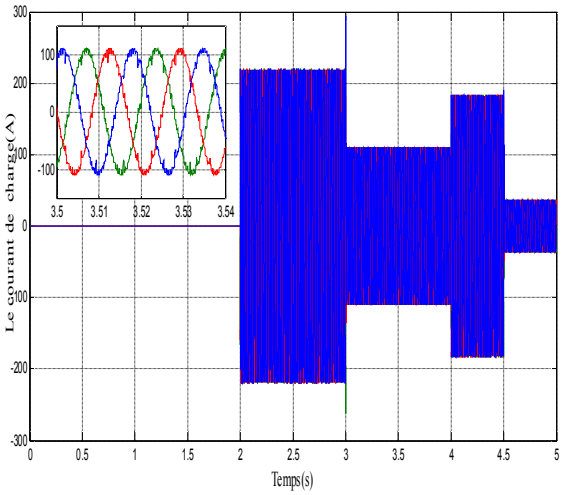



Figure III. 40 Le courant de charge

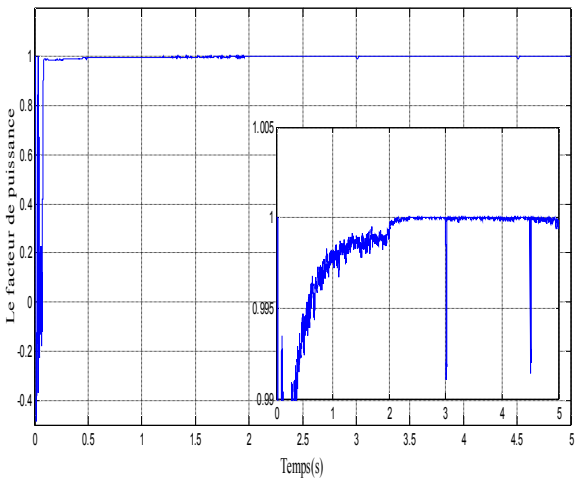



Figure III. 41 Le facteur de puissance

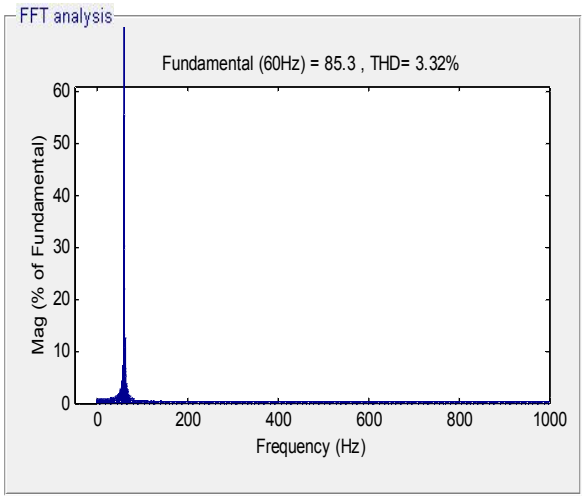



Figure III. 42 Les harmoniques de courant

## III. 12 Conclusion

L'intérêt principal de ce chapitre est la simulation d'un parc éolien terrestre pour donner une puissance considérable à couvrir la demande d'électricité. Pour cela, nous avons présenté les modèles mathématiques des composants du système de conversion de l'énergie éolienne, de la voilure, de la génératrice synchrone à aimants permanents et enfin la commande du système a été détaillée. La simulation est faite pour un parc éolien de six turbines connectées au même bus continu et au même onduleur qui raccorde le système au réseau électrique. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité de commandes appliquées ; la logique floue à suivre le point de puissance maximale, le contrôle du bus DC à stabiliser la tension et la commande vectorielle à donner un facteur de puissance unitaire.

# *Chapitre IV*

# Intégration des Energies Renouvelables dans le Bâtiment avec la Simulation des Différentes Topologies d'Hybridation

# IV. 1 Introduction

Les bâtiments, qui sont d'énormes consommateurs d'énergie, permettront de réduire considérablement la demande d'énergie si l'on y intègre des systèmes d'énergie renouvelable. Les éoliens et les panneaux solaires intégrés au bâtiment sont la conception la plus attirante dans le domaine de l'énergie de nos jours. Les avantages de l'intégration des RES au bâtiment sont que plus d'espace est disponible sur le bâtiment pour l'installation de la surface requise des systèmes RES et que le composant de construction traditionnel est remplacé par celui RES, ce qui augmente la viabilité économique des systèmes [89].

Dans les villes, les bâtiments sont connectés au réseau électrique, sans avoir besoin d'un système de stockage. Donc, l'intégration de l'énergie photovoltaïque et éolienne au bâtiment, permit de réduire leurs pertes de transmission et de distribution. Les systèmes éolien/photovoltaïque peuvent fournir l'électricité nécessaire au bâtiment, dont l'excédent peut être alimenté/vendu au réseau.

L'énergie solaire est, après l'énergie éolienne, l'une des ressources énergétiques renouvelables les plus exploitées [90]. Les énergies éolienne et solaire sont gratuites dans leur disponibilité, non polluantes et sont considérées comme des sources d'énergie les plus prometteuses. Cependant, ces énergies dépendent absolument des conditions météorologiques et elles sont affectées par la saison, la géographie et de nombreux autres facteurs qui empêchent de fournir une puissance constante aux charges. L'hybridation de ces deux systèmes permet de bien profiter les deux sources naturelles l'ensoleillement et le vent au même temps pour donner une puissance plus stable et fiable.

Dans ce chapitre, on intéresse à l'intégration du système hybride (photovoltaïque/ éolien) dans les zones urbaines. Pour cela, une étude théorique sur l'intégration de ces énergies dans le bâtiment est présentée. Ensuite, Trois topologies d'hybridation sont appliquées pour combiner les deux systèmes PV/éolien efficacement. La première est la connexion de deux sources à un bus DC avec un control MPPT individuel pour bien suivre le point de puissance maximale. La deuxième, est de connecter les deux sources au même convertisseur DC/DC avec un MPPT commun pour minimiser le nombre des convertisseurs utilisés. Ensuite, la troisième est la connexion à un bus AC avec des onduleurs individuels. La modélisation et la simulation de trois topologies d'hybridation est détaillée avec une étude comparative entre les

trois systèmes hybrides et les systèmes à une seule source d'énergie renouvelable (Photovoltaïque, éolien).

## IV. 2 Intégration des énergies renouvelables dans les zones urbaines

Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale vit dans des villes [91]. Quand, les bâtiments sont responsables de 30-40% de toute l'énergie primaire et 40-50% des gaz à effet de serre émis [92]. En général, les énergies PV et éolienne sont complémentaires : les jours ensoleillés sont généralement calmes et les vents forts se produisent souvent pendant les jours nuageux ou la nuit [93]. Par conséquent, elles sont le plus souvent déployées ensemble, formant un système hybride. Un système hybride photovoltaïque/éolien sans stockage présente une bonne alternative pour satisfaire les besoins en électricité pour les sites connectés au réseau national, en particulier lors de la pointe de consommation [62].

Les maisons et les quartiers peuvent avoir une production locale d'énergie verte afin de diminuer l'empreinte CO2 résidentielle et de réduire la pression de la demande d'énergie sur le réseau principal [94]. Les toits des bâtiments peuvent être un excellent emplacement pour une éolienne et les générateurs photovoltaïques, car ils permettent de profiter des avantages des vents plus rapides et du rayonnement intense, tout en réduisant le coût des tours de support et les câbles de transmission lorsque la production d'électricité est proche à l'utilisateur. On peut même prendre en considération tous les critères essentiels pour l'intégration de ces sources d'énergies (éolienne et photovoltaïque) au bâtiment avant sa construction pour donner une meilleure qualité d'énergie.

### IV. 2 Installation des éoliennes aux bâtiments

L'éolien urbain est un concept consistant à installer et exploiter des éoliennes de petites tailles et petites puissances en milieu urbain, qui peuvent être intégrées aux bâtiments ou installées au sol. Donc, le bâtiment devient un générateur d'électricité au lieu d'un consommateur. Le bon choix de la zone d'installation des turbines (coté venteux), peut produire une énergie très considérable et capable à couvrir la consommation demandé.

Certains constructeurs ont développé différents types d'éoliennes qui peuvent s'adapter aux conditions particulières des zones urbaines [53]. On trouve les éoliennes a axe vertical (savonuis et darrius) et les petites éoliennes a axe horizontal de 5 à 20 m avec un diamètre

compris entre 2 et 10 m, et une production pouvant aller jusqu'à 20 kW qui elles sont fabriquées spécialement pour l'intégration dans les zones urbaines. Les éoliennes peuvent être intégrées dans un bâtiment sous de nombreuses formes, l'objectif principal étant d'augmenter la vitesse du vent.

### IV. 2. 1 Éoliennes montées sur bâtiment

Ce type représente l'installation des éoliennes autour et sur les bâtiments. Généralement, la position au sommet du bâtiment est souvent choisie pour profiter le maximum du vent disponible afin d'éviter un écoulement turbulent autour du bâtiment. Il existe deux types d'éoliennes de petite taille distinguées à l'intégration au bâtiment, éolienne à axe horizontal (HAWT) et à axe vertical (VAWT)

#### IV. 2. 1. 1 Éolienne HAWT montée sur bâtiment

L'éolienne HAWT est la plus performante, bien que bruyante et plus chère. Le bruit peut être minimisé en utilisant des conceptions de pales à faible bruit, des isolateurs de vibrations. Ce type est généralement monté sur un mât, puis sur la structure du toit.

Figure IV. 1 Turbines à axe horizontal montées sur un toit d'un bâtiment

### IV. 2. 1. 2 Éolienne VAWT montée sur bâtiment

Les éoliennes à axe vertical (VAWT) deviennent de plus en plus intéressantes et populaires pour l'intégration aux bâtiments grâce a son silence pendant leur fonctionnement (moins de bruit par rapport au éoliennes HAWT). La figure IV. 2 illustre divers exemples d'éoliennes VAWT montées sur bâtiment, où elles sont installées sur une sous-structure, avant d'être montées sur le toit.

Figure IV. 2 Turbines à axe vertical

### IV. 2. 2 Construction de turbines éoliennes intégrées

Dans ce type de construction, l'éolienne fait partie de la structure ou de la façade du bâtiment. Les exemples ci-dessous, démontrent que les éoliennes peuvent devenir un élément architectural important.

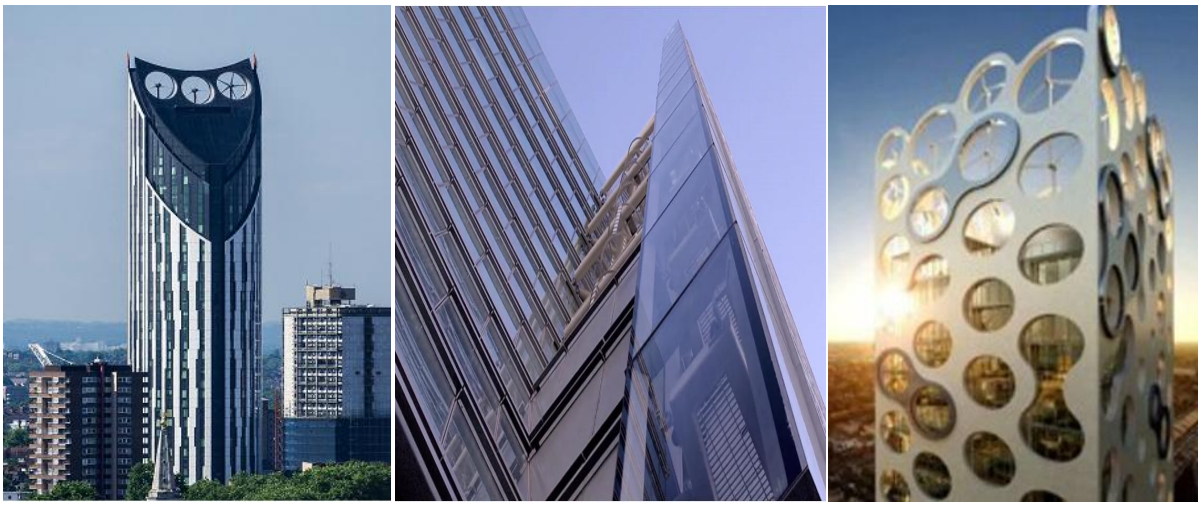


Figure IV. 3 Des turbines intégrées dans le bâtiment

### IV. 2. 3 Construction de turbines éoliennes augmentées

L'éolienne dans ce type de construction, fait partie de la conception du bâtiment. Une parité ou un côté du bâtiment est construit d'une manière adaptative afin d'augmenter la vitesse du vent pour une meilleure installation des éoliennes.

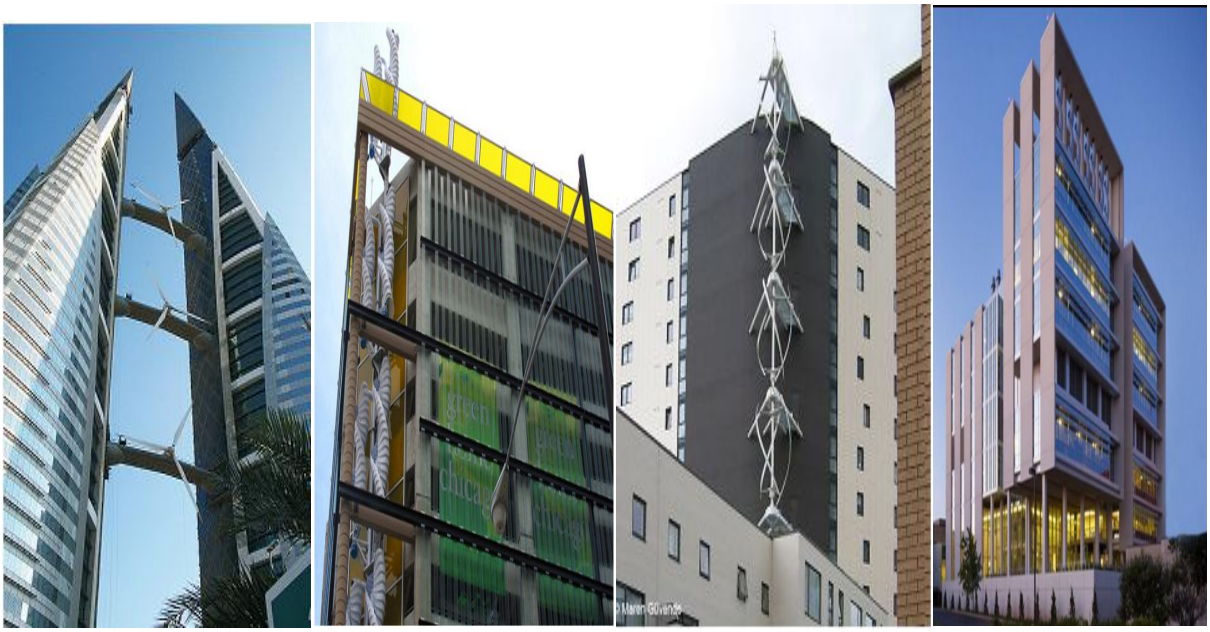


Figure IV. 4 Des turbines augmentés au bâtiment

La vitesse du vent peut être améliorée en utilisant la forme du bâtiment pour accéder à des niveaux du vent de meilleure qualité en concentrant localement les vents [95]. Dans la figure suivante plusieurs types d'installation des éoliennes dans le bâtiment sont présentés avec une étude comparative dans le tableau IV. 1, qui montre l'efficacité des bâtiments A, B, C et D à augmenter la vitesse du vent de 20 à 40%, où La meilleure performance de l'éolienne se produit dans la construction C.

- Bâtiment A meilleur qualité du vent avec une amélioration de 20%.
- Bâtiment B ; La vitesse du vent augmente lorsqu'il traverse une forme arrondie (30%)
- Bâtiment C ; La vitesse du vent augmente au centre entre les tours arrondies jusqu'à 40%
- Bâtiment D ; Cette construction soutient la turbine avec mois de vibrations avec une accélération du vent jusqu'à 25%.
- Bâtiment E ; Cette conception aérodynamique ne peut pas augmenter la vitesse du vent.

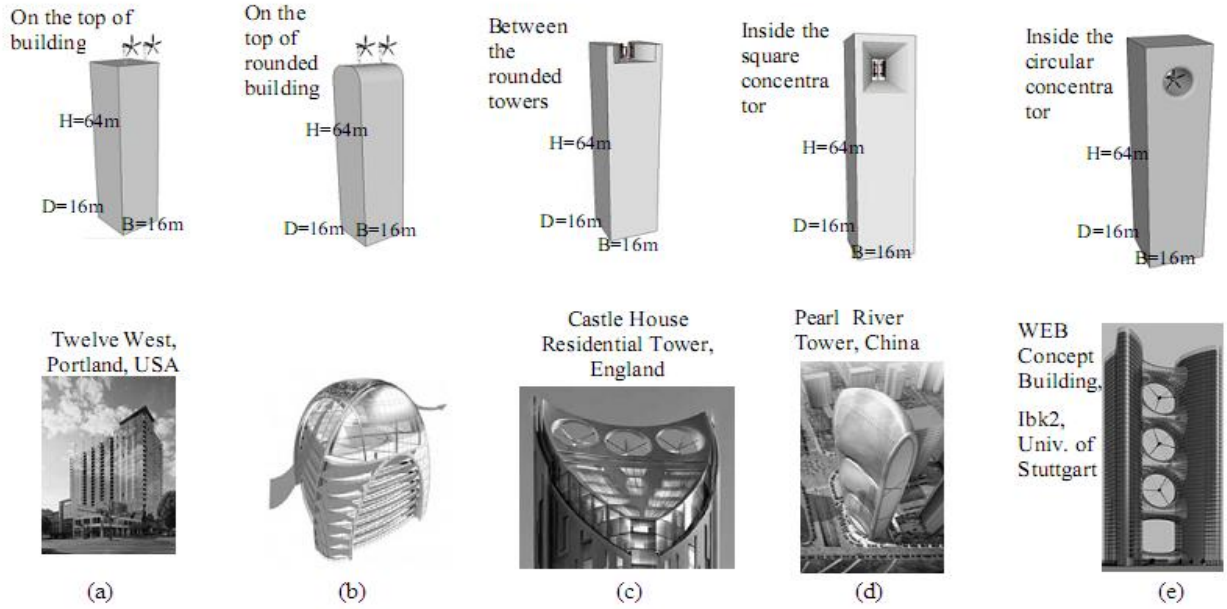



Figure IV. 5 Des turbines intégrées et augmentées dans le bâtiment

Tableau IV. 1 Répertoire de l'amélioration de la vitesse du vent et de l'emplacement des éoliennes BIWT [95]

| Type | Amélioration de la vitesse du vent Éolien | emplacement des éoliennes | Emplacement, Conception du modèle et type de turbine |
|---|---|---|---|
| A | 20% de la vitesse d'approche (12 m/s) | Surface du bâtiment exposée au vent | Éolienne à axe horizontal (HAWT) - nécessite une tour élevée pour atteindre la vitesse maximale du vent. |
| B | 30% de la vitesse d'approche (13 m/s) | Au milieu d'une forme arrondie | Éolienne à axe horizontal (HAWT) - nécessite une tour élevée pour atteindre la vitesse maximale du vent. |
| C | 40% de la vitesse d'approche (14 m/s) | Au milieu d'une tour arrondie | Éolienne à axe vertical (VAWT) - récolte le vent des deux côtés. |
| D | 25% de la vitesse d'approche (12.5 m/s) | Au milieu d'un concentrateur carré | Éolienne à axe vertical (VAWT) - récolte le vent des deux côtés et réduit le bruit et les vibrations. |
| E | Stable (10 m/s) | Au milieu d'un concentrateur circulaire | Éolienne à axe vertical (VAWT) - récolte le vent de deux côtés et réduit le bruit et les vibrations. |

Les formes de toit traditionnelles comme les toits à pignon et les toits en croupe sont préférables aux toits plats car elles peuvent augmenter la vitesse du vent [96].

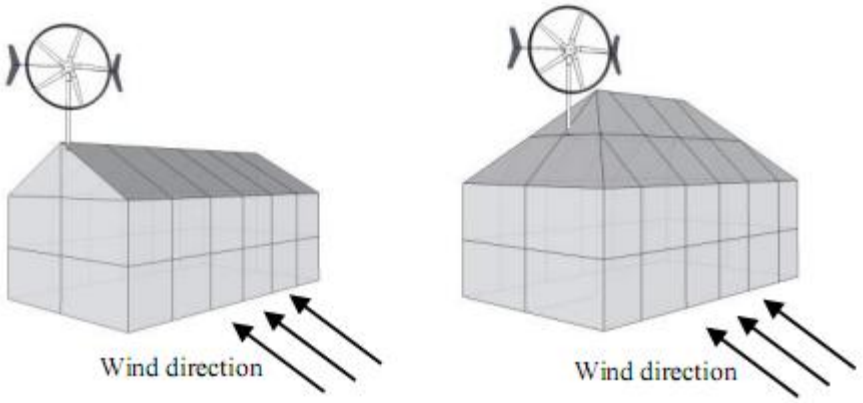



Figure IV. 6 Les toits traditionnels

## IV. 3 L'installation d'énergie photovoltaïque dans le bâtiment

Le soleil se lève à l'est et sa course passe par le sud pour finir à l'ouest. Donc, pour bien tirer le maximum d'énergie solaire pendant toute la journée, il faut bien s'assurer que le panneaux solaire est bien orienté et positionné par rapport à la lumière directe du soleil. En pratique, l'orientation optimale est le sud. L'inclinaison optimale est de 30 à 35° par rapport à l'horizontale. C'est une inclinaison qui favorise la production estivale d'électricité, quand le soleil est le plus haut dans le ciel et le plus rayonnant de l'année. Il faut également s'assurer que l'installation n'est pas cachée par une zone d'ombre (arbre, bâtiment voisin…). Récemment, l'intégration d'élément photovoltaïque dans les structures de bâtiment à de nombreux atouts. Les panneaux solaires sont faciles à mettre en œuvre [97].
Dans une ville donnée, la production annuelle d'énergie solaire dépend sur divers facteurs. Surtout [98] :

- Rayonnement solaire accidentel sur le site d'installation.
- Inclinaison et orientation des panneaux.
- Présence là où il n'y a pas d'ombrage.
- Performance technique des composants du système (principalement des modules et onduleurs).

Le développement rapide de la technologie photovoltaïque permet une intégration facile et diversifiée des générateurs photovoltaïques dans les bâtiments. Il existe deux formes de

l'installation des panneaux solaires à la construction, soit ils sont intégrés directement à la construction du bâtiment, soit ajoutés à celui-ci.

### IV. 3. 1 L'intégration photovoltaïque aux bâtiments (BIPV)

Les BIPV sont considérés comme une partie fonctionnelle de la structure du bâtiment, ou ils sont architecturalement intégrés dans la conception du bâtiment [99].

Les produits du système BIPV (bâtiment intégré photovoltaïque), ont été classés dans les groupes suivants :

- Produits en feuille BIPV.
- Produits de tuiles BIPV.
- Produits de modules BIPV.
- Produits de vitrage à cellules solaires.

En outre, le groupe des produits BAPV (Bâtiment attenant Photovoltaïque) doit également être considéré.

#### IV. 3. 1. 1 Produits en feuille

Les produits en feuille BIPV sont légers, flexibles et facile à installer évitant les contraintes de poids. Ce type peut être installé à n'import quelle forme de bâtiment plates, inclinées ou rondes. Les produits PV en feuille ont un faible rendement et des grandes résistances des cellules solaires à couche mince.

Figure IV. 7 Cellule flexible en feuille

### IV. 3. 1. 2 Produits de tuiles BIPV

La tuile photovoltaïque est un matériau de couverture qui remplace la tuile ou des parties sélectionnées du toit, en remplaçant une partie de la toiture par des cellules PV assemblées directement sur les tuiles ou les modules qui ont la même dimension et la même forme que les éléments de construction existants auxquels ils s'intègrent.

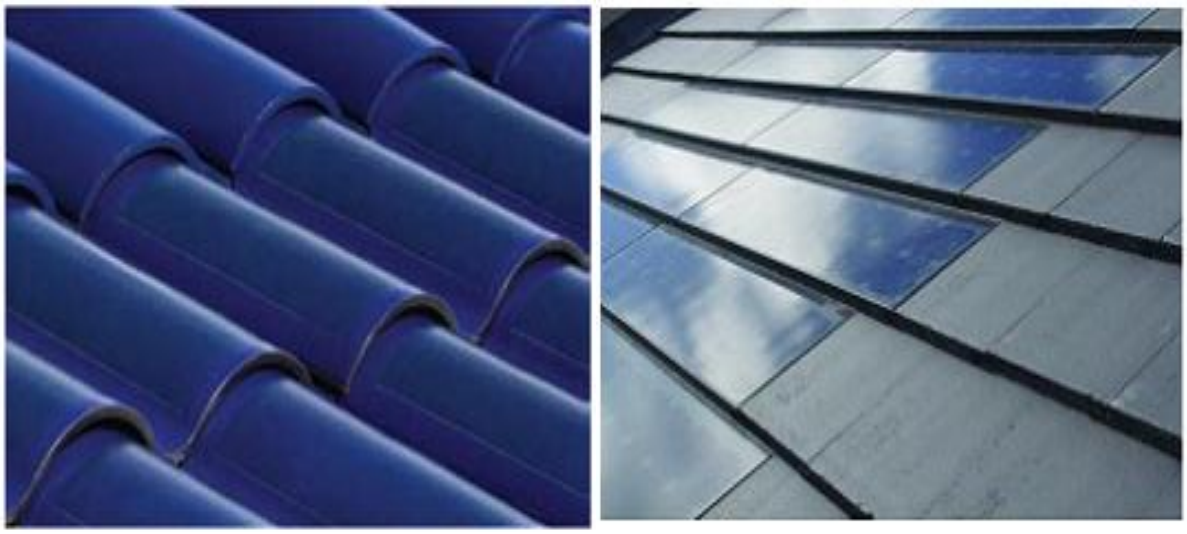


Figure IV. 8 Les tuiles BIPV

### IV. 3. 1. 3 Les produits de modules BIPV

Ils sont peu similaires aux modules PV classiques. Cependant, ces modules BIPV sont fabriqués avec des solutions de peau d'étanchéité pour être capable à remplacer divers types de toit ou façade. Ces systèmes de montage augmentent la facilité d'installation [100].

Figure IV. 9 Des modules PV augmentés dans le bâtiment

### IV. 3. 1. 4 Produits de vitrage à cellules solaires

Les produits de vitrage BIPV à cellules solaires transparent ou semi transparent offrent une grande variété d'options pour les fenêtres, les façades vitrées et les toits. Les différentes couleurs et transparences permettent d'obtenir des résultats esthétiques très variés [100].

Figure IV. 10 Vitrages photovoltaïques

### IV. 3. 2 Produits BAPV

Les produits BAPV sont considérés comme un ajout au bâtiment, plutôt que être intégrer à la construction du bâtiment. Par conséquent, leurs structures sont simples à monter et à entretenir.

Figure IV. 11 Des modules PV augmentés dans le bâtiment

## IV. 4 Intégration de système hybride (solaire et éolien) dans le bâtiment (BIPVWT)

HRES combine des systèmes photovoltaïques et éoliens pour tirer le meilleur parti des ressources solaires et éoliennes saisonnières de la région [101]. En intégrant ces systèmes hybride dans le bâtiment peuvent utiliser efficacement l'espace urbain et améliorer l'utilisation de ces énergies. L'utilisation de l'énergie dans le secteur du bâtiment peut être optimisée en utilisant une gamme de développements technologiques et de compétences [102].

Le système solaire, ne peut produire de l'électricité que pendant la journée, le vent est plus disponible pendant la nuit et les mois d'hiver. En résulte, l'intégration de ces deux systèmes est nécessaire pour que l'un compléter l'autre pour donner une énergie plus stable pendant tout la journée. Ces HRES fournissent une production plus constante tout au long de l'année que les systèmes solaires ou éoliens individuels et peuvent être conçus pour atteindre les attributs souhaités au coût le plus bas possible [103].

Figure IV. 12 Système hybride (photovoltaïque et éolien) installé dans le bâtiment

## VI. 5 Topologie d'hybridation des systèmes Eolien/PV connectés au réseau électrique

La technique d'interconnexion de système hybride (éolien et photovoltaïque) au réseau électrique joue un rôle important à l'amélioration des performances de système globale. Généralement il existe deux architectures d'hybridation de ces deux sources renouvelable (éolienne, photovoltaïque), connexion à bus continu et connexion à bus alternatif. La première est basée sur la connexion de deux sources (éolienne et photovoltaïque) au bus continu DC par différents convertisseurs. Ensuite le bus continu est connecté au réseau électrique à travers un seul onduleur. Dans la deuxième topologie, les deux systèmes sont connectés au bus alternatif AC à travers des onduleurs individuels. L'objectif principal de ces topologies d'hybridation est l'amélioration de la qualité d'énergie injectée au réseau électrique et à la charge avec des meilleures performances d'intégration. Les deux topologies sont représentées dans la figure (IV. 13)

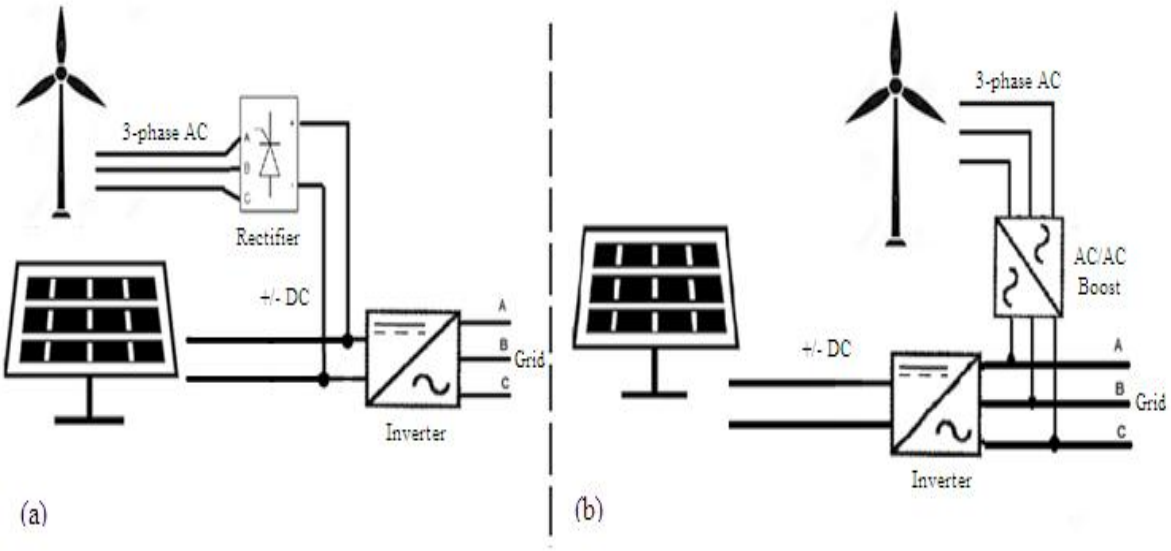



Figure IV. 13 Topologies de système hybride ; (a) la connexion DC, (b) la connexion AC

### VI.5. 1 Système hybride à bus DC

Il existe deux topologies pour la connexion au bus DC ; soit chaque système est connecté à ce bus à travers son convertisseur DC/DC contrôlé indépendamment par des MPPT individuels. Soit que les deux systèmes sont connectés au même convertisseur DC/DC avec une régulation MPPT commune comme il est présenté dans la figure suivante :

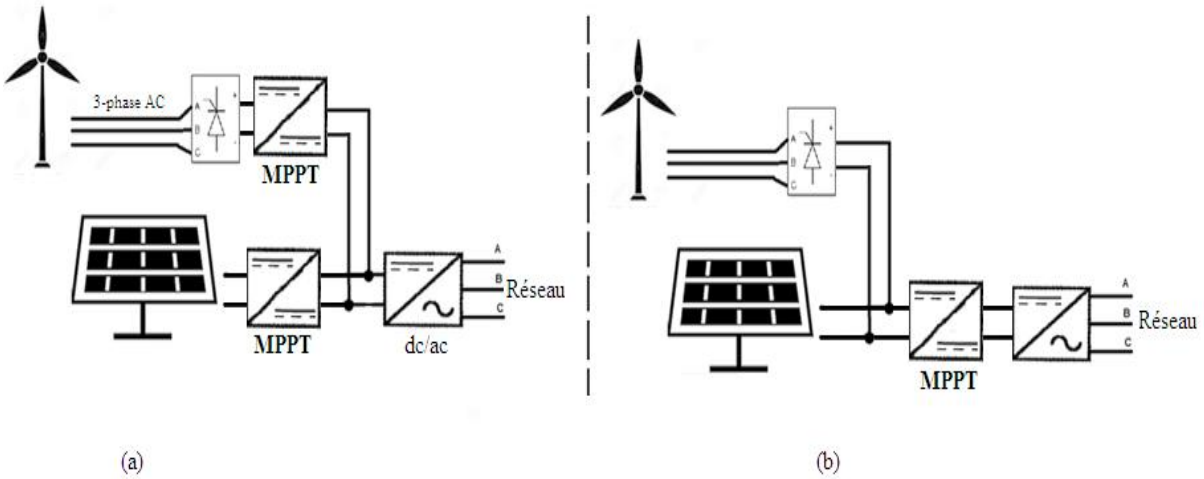



Figure IV. 14 Topologies du raccordement de système hybride au bus DC, (a) MPPT individuel, (b) MPPT commun

### IV. 5. 1. 1 Système hybride avec MPPT individuels

La figure (IV. 15) illustre le système hybride qui combine le système éolien et le système photovoltaïque donnant une puissance totale de 50kW (25kW de PV et 25kW de WECs). Les deux systèmes sont connectés au bus DC via des convertisseurs DC/DC commandés par la logique floue pour extraire la puissance maximale de chacun. Le système global est connecté au réseau électrique à l'intermédiaire d'un onduleur contrôlé par la commande vectorielle et un filtre RL pour minimiser les harmoniques du courant. Le compteur tourne dans les deux sens ; L'excès de production est injecté au réseau électrique et en cas de faible production, l'électricité est prélevée par le réseau.

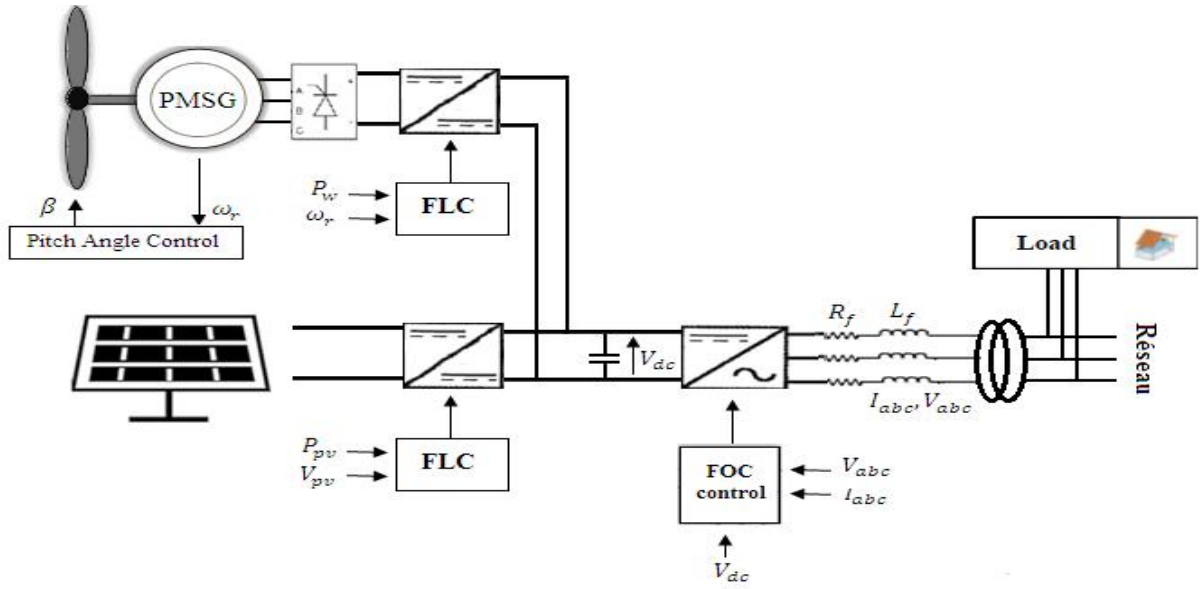



Figure IV. 15 Schéma de principe du système hybride avec des MPPT individuels

L'énergie hybride générée par les éoliennes et les systèmes PV est donnée par l'équation (IV.1) :

$$P_{totale} = P_{pv} + P_{éolienne} \quad \text{(IV.1)}$$

En fonction de la demande de charge et de la puissance totale hybride produite, différents situations peuvent se produire :

- si $P_{totale} = P_{charge}$;

Dans ce cas, l'énergie hybride produite répond à la demande de la charge, il n'y a donc ni excédent ni déficit d'énergie.

- Si $P_{totale} < P_{charge}$ ;

L'énergie totale générée est inférieure à la demande de charge, donc il y aura un déficit de puissance qui sera récupérée par le réseau électrique.

- Si $P_{totale} > P_{charge}$ ;

L'énergie totale générée est supérieure à la demande, donc une énergie excédentaire est injectée au réseau électrique.

**Résultats de la simulation**

Le système hybride étudié est pour l'installation résidentielle qui donne une puissance maximale de 50kW, connecté au réseau électrique pour atteindre la stabilité énergétique aux consommateurs. Le système est simulé sous MTALAB/simulink pour vérifier les performances du système sous l'influence de variation des conditions métrologiques et la variation de charge (figures IV. 16, IV. 17, IV. 18).

Pour le système éolien, le courant et la puissance éolienne varient avec la variation de la vitesse du vent comme il est montré dans les figures (VI. 20, VI. 22). La même chose pour le courant et la puissance photovoltaïque qui ils sont variés frottement avec la variation de l'ensoleillement (figures IV. 19 et IV. 21).

D'après la figure IV. 23, on voit que le système hybride profite toutes les conditions climatiques (l'ensoleillement et le vent) instantanément pour produire plus d'énergie. La puissance hybride est la somme de la puissance éolienne et la puissance photovoltaïque qui

donne une puissance variable encore avec les conditions climatiques mais elle reste plus stable par rapport aux systèmes individuels ; Quand il y a du vent et du soleil, l'énergie est fournie par les deux sources et quand il n'y a que du soleil, le système fournit toujours l'énergie. Quand on a que le vent le système ne s'arrêtes pas comme c'est le cas de système photovoltaïque. Le système assure une énergie plus stable par rapport aux systèmes individuels.

L'échange de l'énergie entre le système et le réseau est bien contrôlé, l'énergie supplémentaire est injectée au réseau électrique instantanément et la puissance déficit est récupérée par ce dernier avec un facteur de puissance unitaire comme il est présenté dans les figures (IV. 24).

La figure (IV. 25) présente la tension du bus continu qui est gardé constante (400V) malgré toutes les variations appliquées. Les courants et les tensions sont sinusoïdales avec un THD moins de 5% (figures (IV. 27, IV. 28) et la figure(IV.26)).

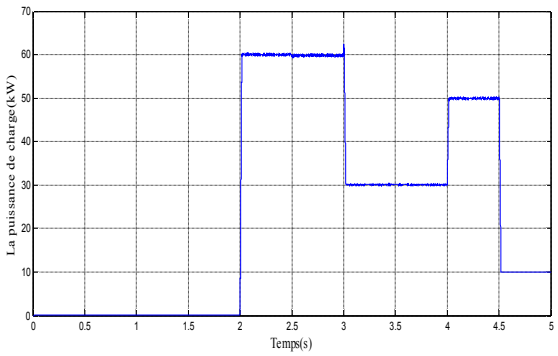



Figure IV. 16 La puissance demandée

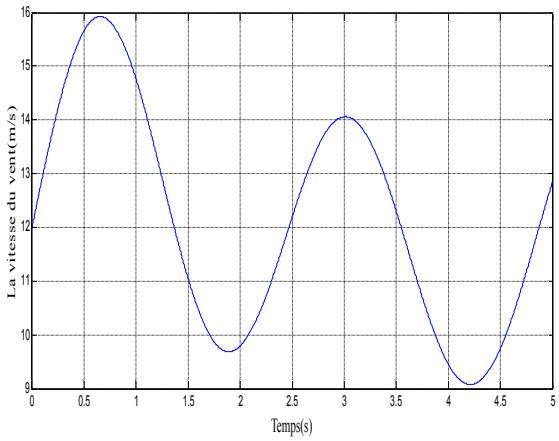



Figure IV. 17 Profile du vent

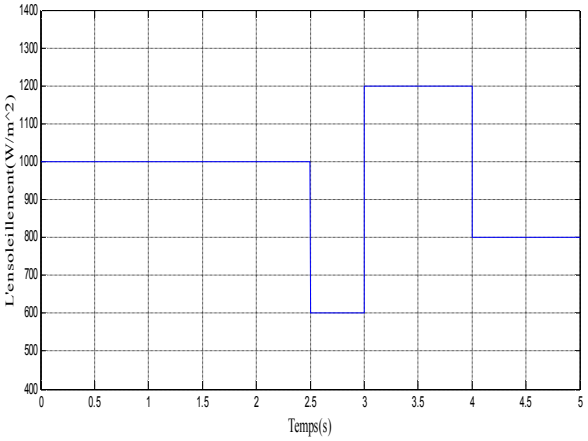



Figure IV. 18 Le profile de l'ensoleillement

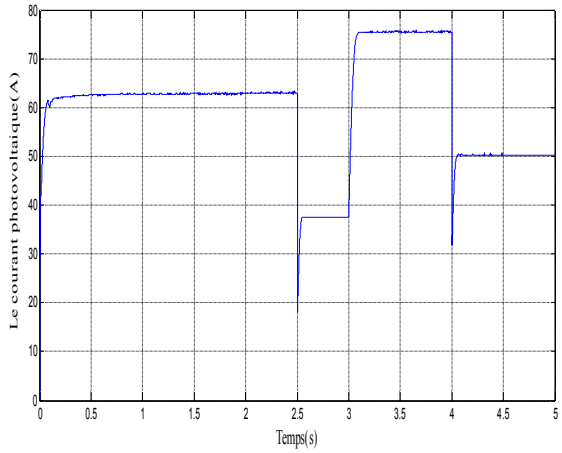



Figure IV. 19 Le courant photovoltaïque

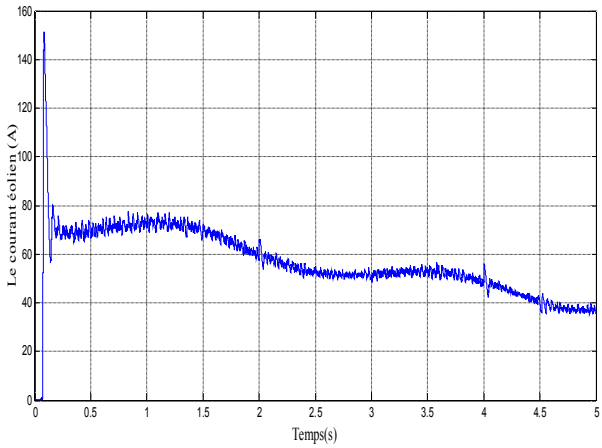



Figure IV. 20 Le courant éolien

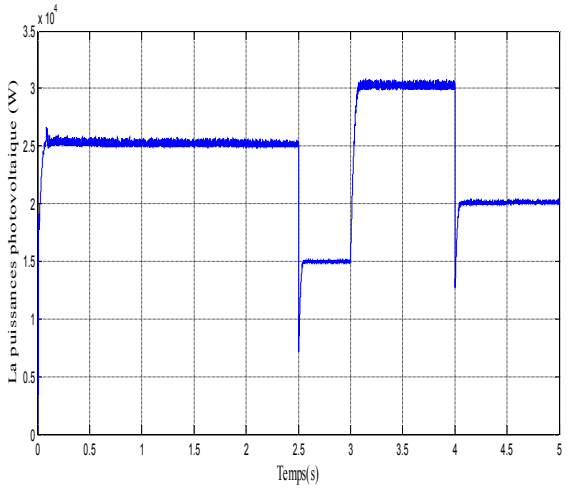



Figure IV. 21 La puissance photovoltaïque

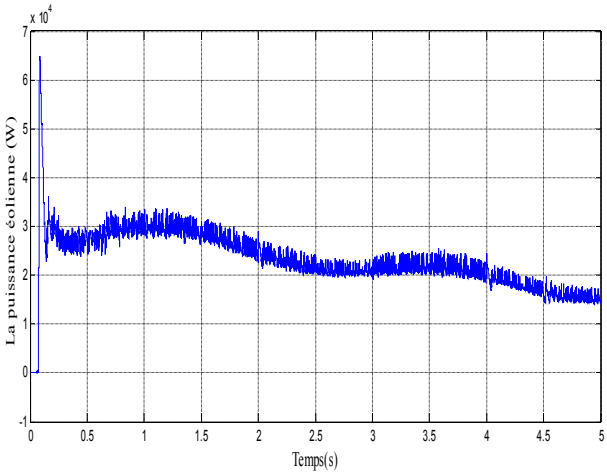



Figure IV. 22 La puissance éolienne

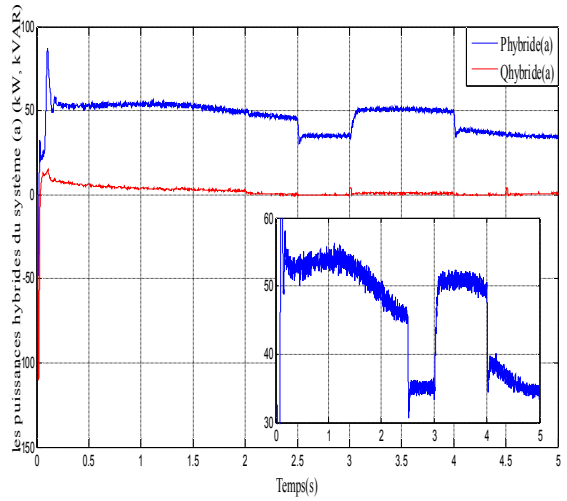



Figure IV. 23 Les puissances de l'onduleur

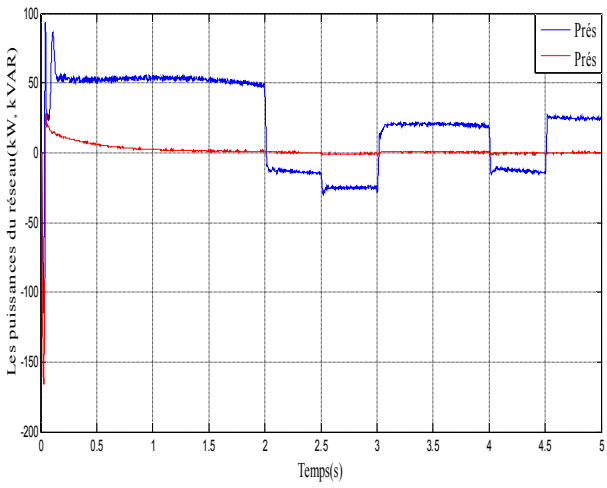



Figure IV. 24 Les puissances du réseau

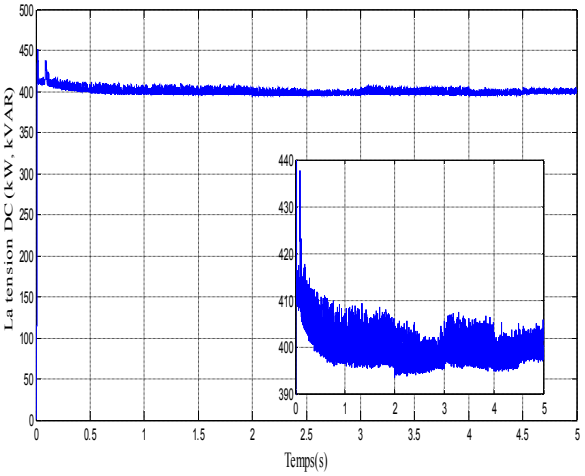



Figure IV. 25 La tension continue

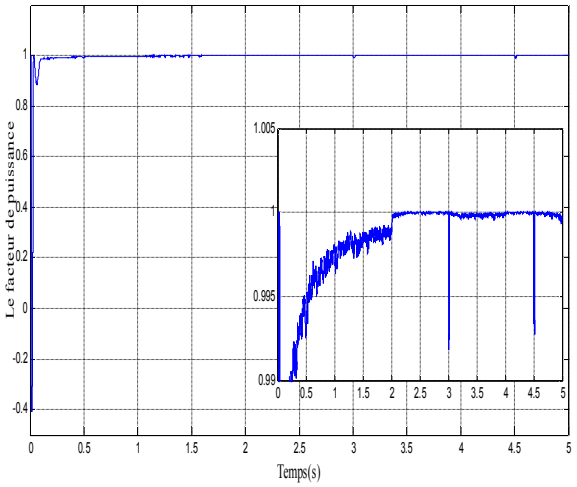



Figure IV. 26 Le facteur de puissance de l'onduleur

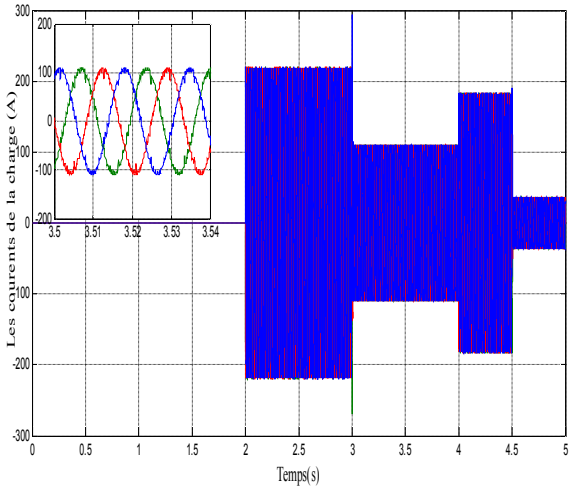



Figure IV. 27 Le courant de charge

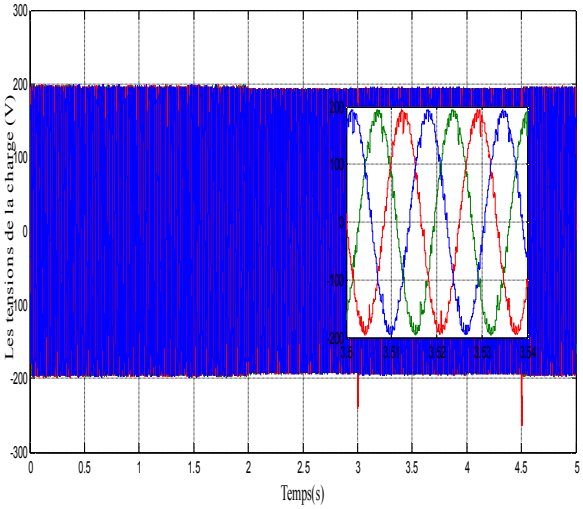



Figure IV. 28 La tension de charge

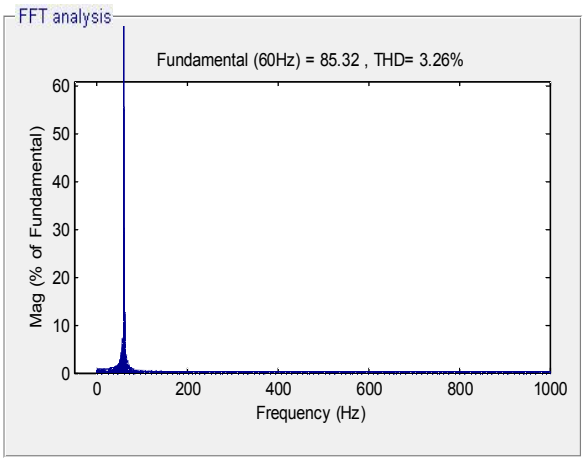



Figure IV. 29 Les harmoniques de courant

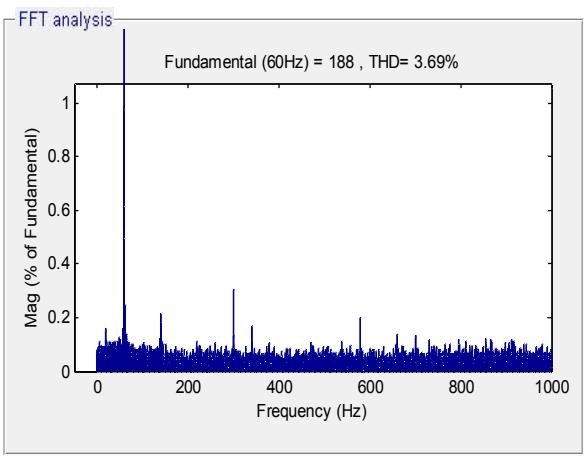



Figure IV. 30 Les harmoniques de tension

### IV. 5. 1. 2 Système hybride avec MPPT commun

Un convertisseur de moins dans la topologie proposée entraîne une réduction du nombre de commutateurs. Moins de commutateurs donnent moins de pertes de commutation. C'est un grand avantage puisque les pertes du convertisseur contribuent de manière significative aux pertes totales [87]. Dans cette topologie, les deux systèmes photovoltaïque et éolien sont connectés au même onduleur à travers un hacheur commun qui applique une seule commande MPPT pour maximiser la puissance de chaque système. L'avantage essentiel de cette architecture est la diminution de nombre des convertisseurs utilisés qui peut réduire les pertes totale de l'énergie et le coût de l'installation. Le système hybride connecté au même convertisseur DC/DC est détaillé dans la figure (VI. 31)

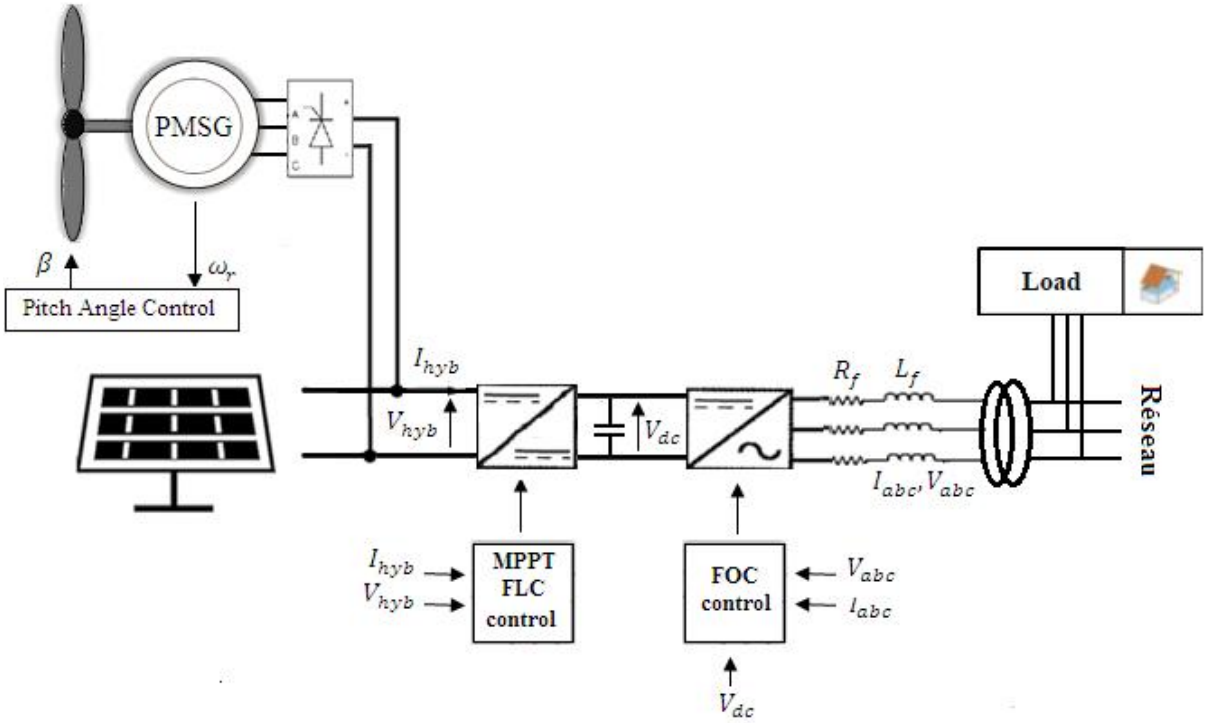



Figure IV. 31 Système hybride connecté au réseau avec un seul MPPT commun

### Résultats de la simulation

Les résultats de simulation de système hybride qui contient deux source d'énergies renouvelables PV et éolien connecté au même hacheur est présentés pour tester leur efficacité vers les variations de l'irradiation, vitesse du vent et le changement de la charge. La puissance produite est supérieure à celle-ci obtenue par la première architecture d'hybridation (MPPT individuels). Mais, ce système présente beaucoup d'oscillation au niveau des puissances et

courants de générateur PV et éolien, avec l'apparition de l'effet du changement d'ensoleillement sur le système éolien (vitesse de rotation, courant et puissance) à t=2.5s, 3s et 4s. Cet effet peut endommager le système éolien mécaniquement et électriquement. La tension continue est toujours constante (400V). Les tensions et les courants triphasés sont en phase grâce à l'unité du facteur de puissance avec un THD un peu plus élève par rapport au THD présenté au système hybride(a) (3.29%).

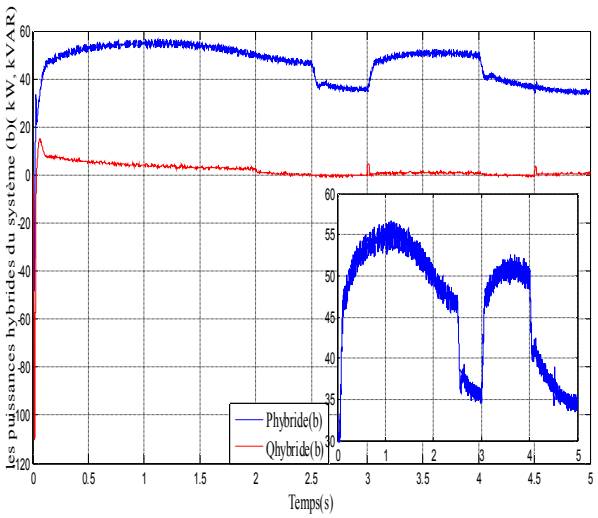



Figure IV. 32 Les puissances de l'onduleur

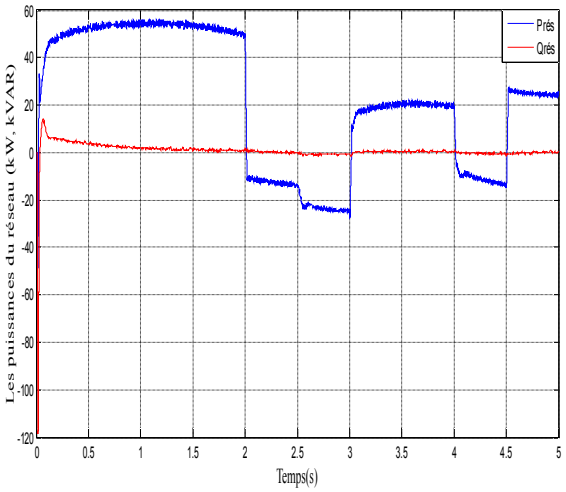



Figure IV. 33 Les puissances du réseau

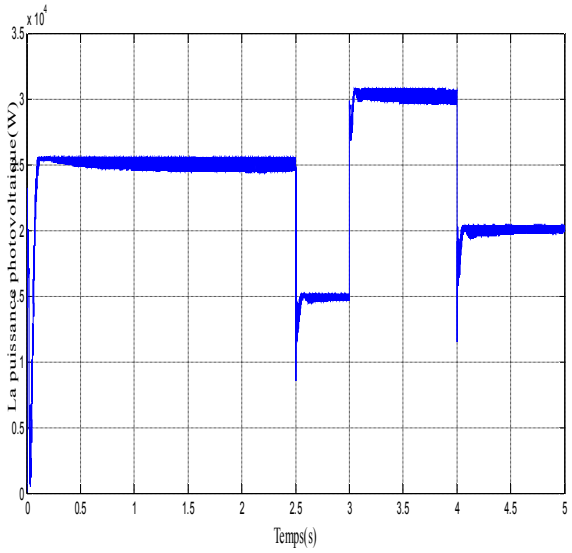



Figure IV. 34 La puissance photovoltaïque

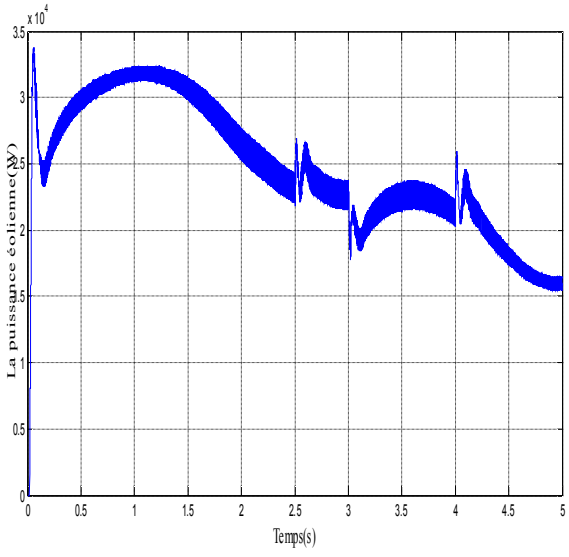



Figure IV. 35 La puissance éolienne

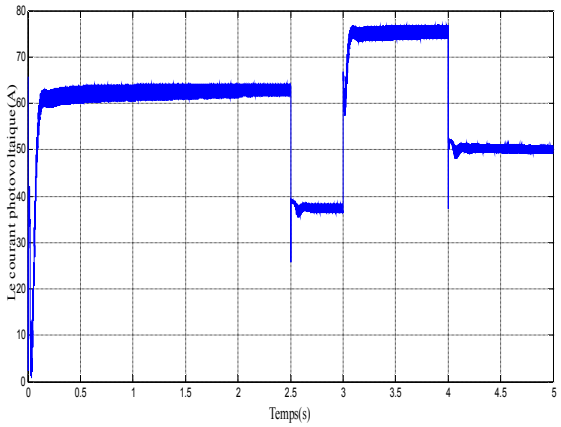



Figure IV. 36 Le courant photovoltaïque

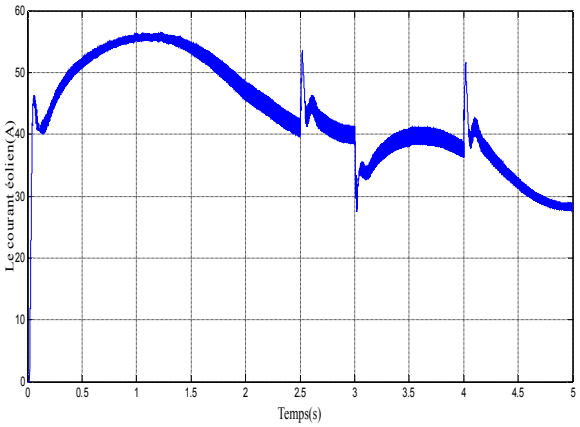



Figure IV. 37 Le courant éolien

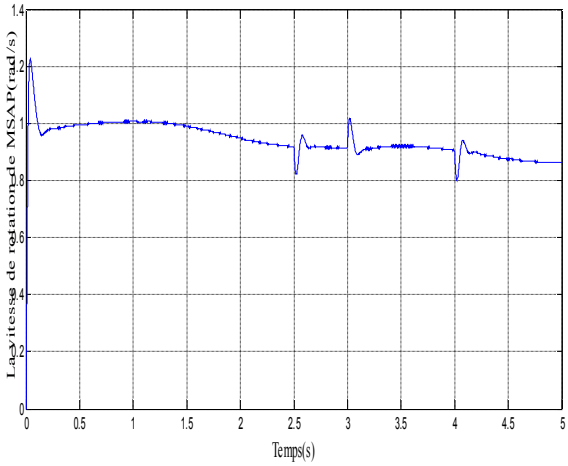



Figure IV. 38 La vitesse de rotation de GSAP

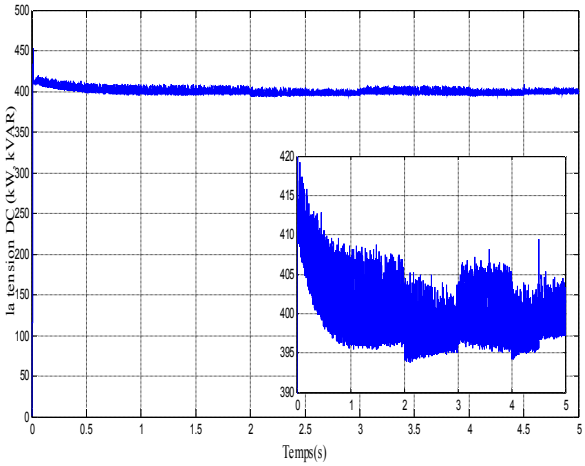



Figure IV. 39 La tension continue

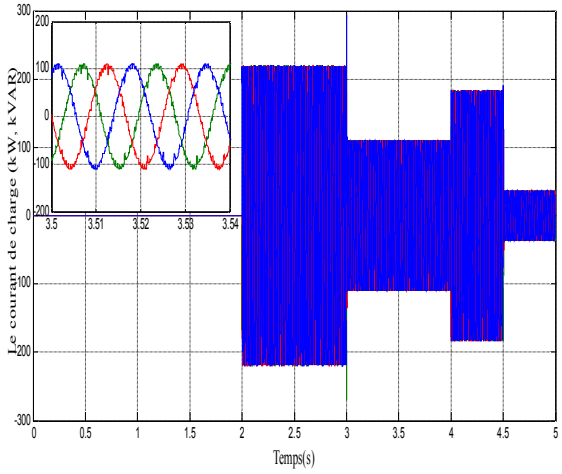



Figure IV. 40 Le courant de charge

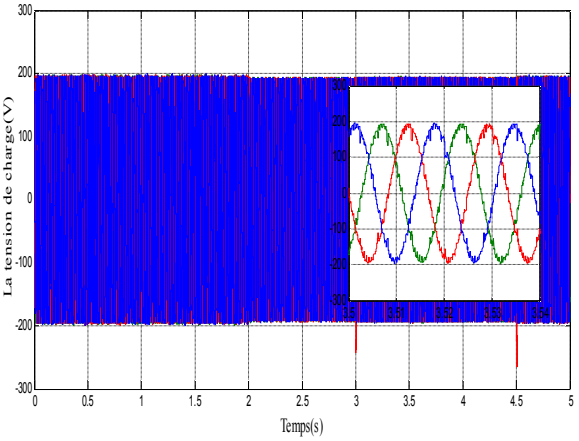



Figure IV. 41 La tension de charge

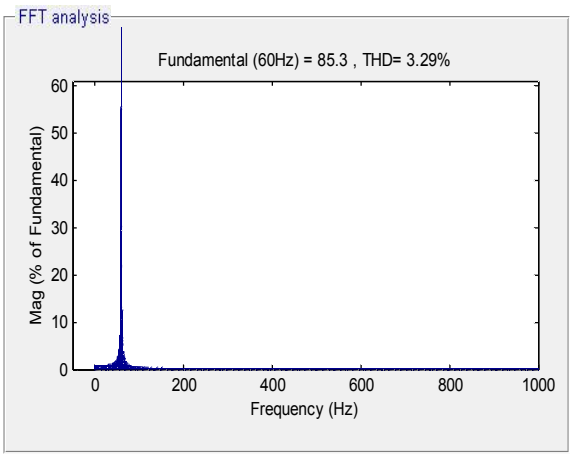



Figure IV. 42 THD du courant

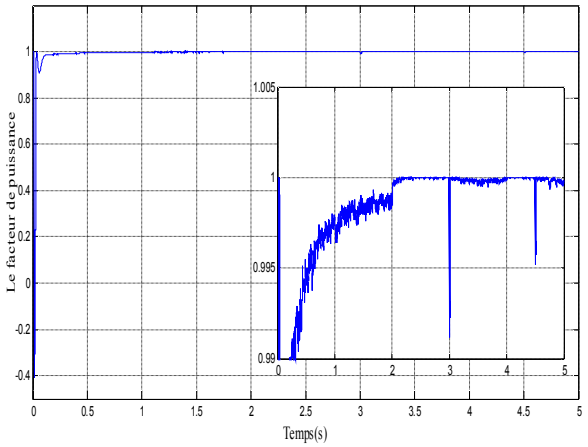



Figure IV. 43 Le facteur de puissance de l'onduleur

### IV. 5. 2 Système hybride à bus AC

Dans cette architecture, chaque source est connectée à un bus AC à travers des onduleurs individuels. Le générateur photovoltaïque est connecté à son onduleur à l'intermédiaire d'un hacheur commandé par logique floue pour la maximisation d'énergie. Le système WECs est encore connecté à un onduleur individuel à travers un hacheur contrôlé par la logique floue pour suivre le point de puissance maximal. Les deux onduleurs sont connectés au réseau électrique à travers un filtre RL pour minimiser les harmoniques de distorsion.

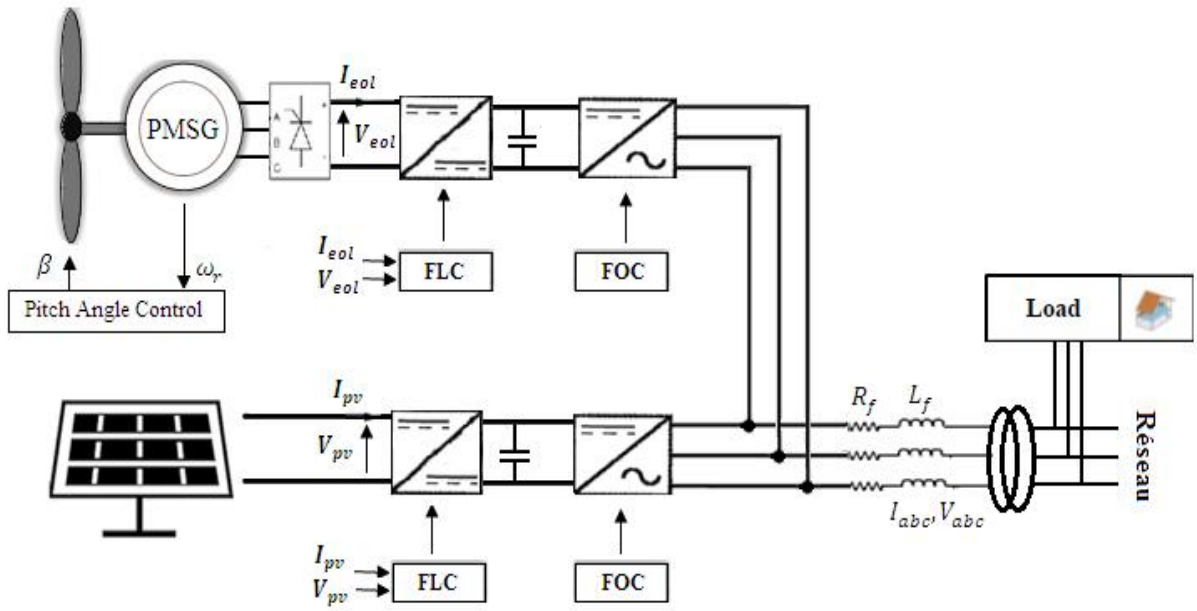



Figure IV. 44 Système hybride à connexion AC

Les résultats de simulations prouvent le bien échange des puissances entre le système et le réseau électrique, le bon fonctionnement des contrôles FLC à bien suivre la puissance maximale malgré la variation d'ensoleillement et de la vitesse de vent et l'efficacité de cette architecture à diminuer les oscillations présentés dans les autres architectures. Les tensions et les courants sont toujours en phase avec un facteur de puissance unitaire et un THD de (3.14%) mois que les autres.

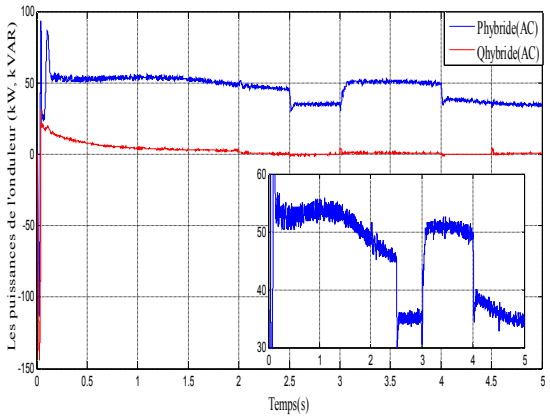



Figure IV. 45 Les puissances de l'onduleur

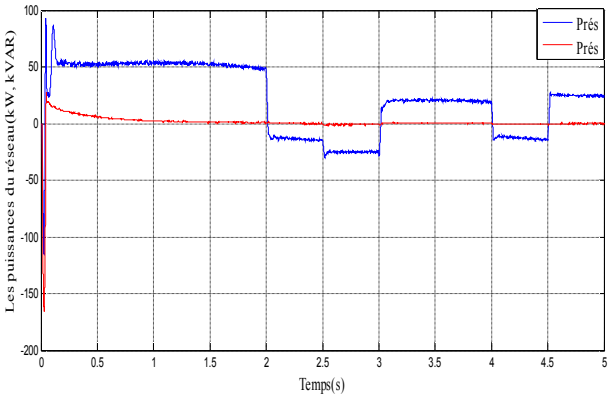



Figure IV. 46 Les puissances du réseau

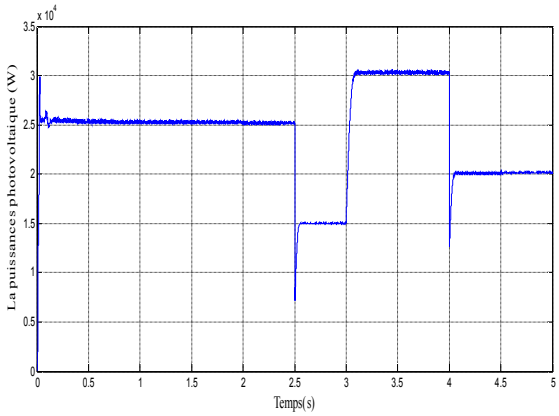



Figure IV. 47 La puissance photovoltaïque

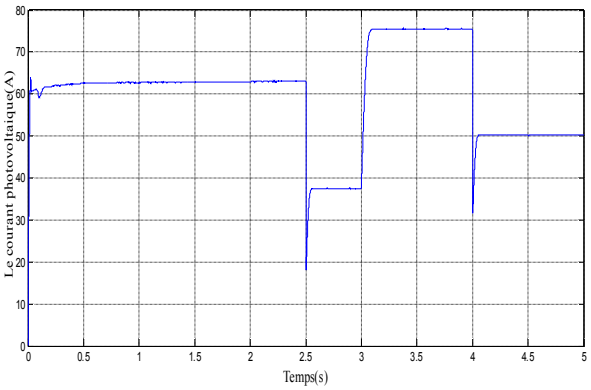



Figure IV. 48 Le courant photovoltaïque

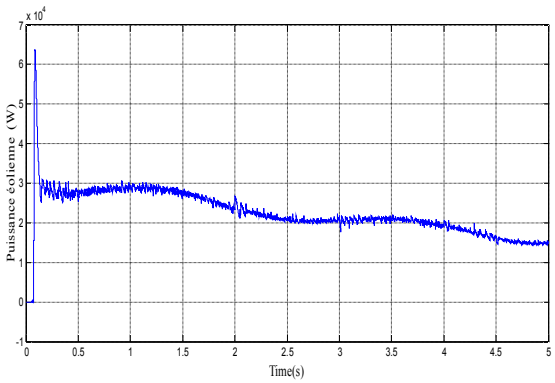



Figure IV. 49 La puissance éolienne

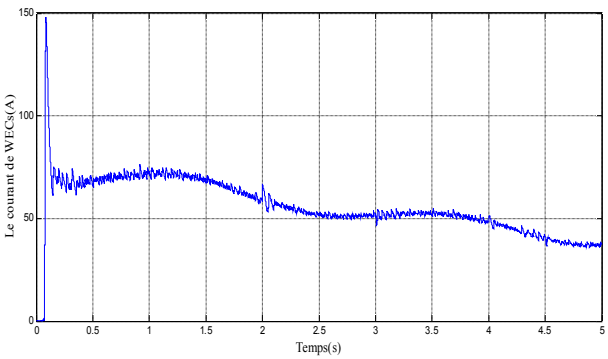



Figure IV. 50 Le courant éolien

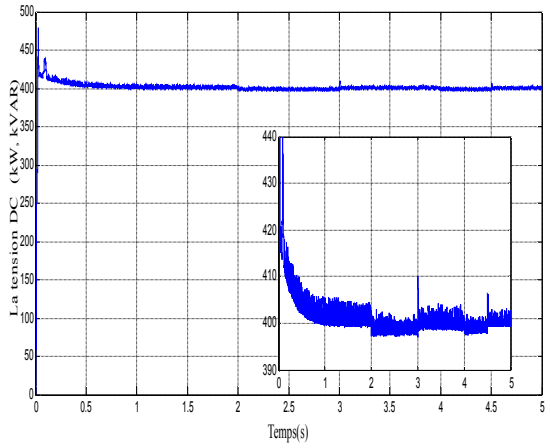



Figure IV. 51 La tension continue

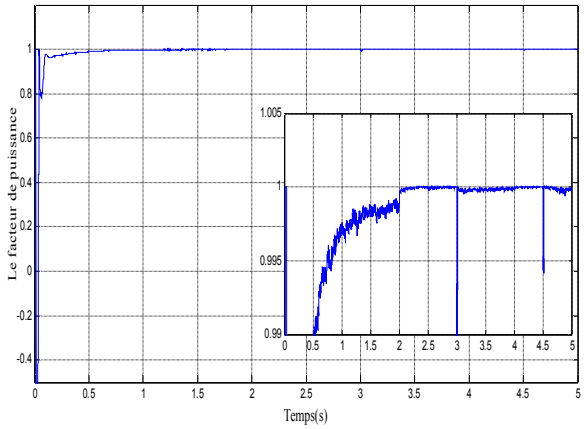



Figure IV. 52 Le facteur de puissance

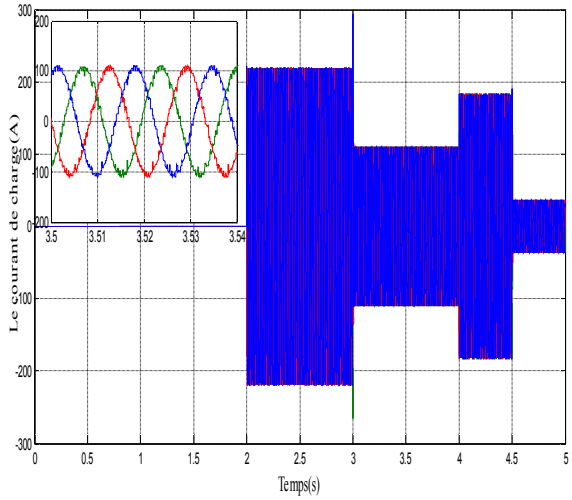



Figure IV. 53 La tension AC de charge

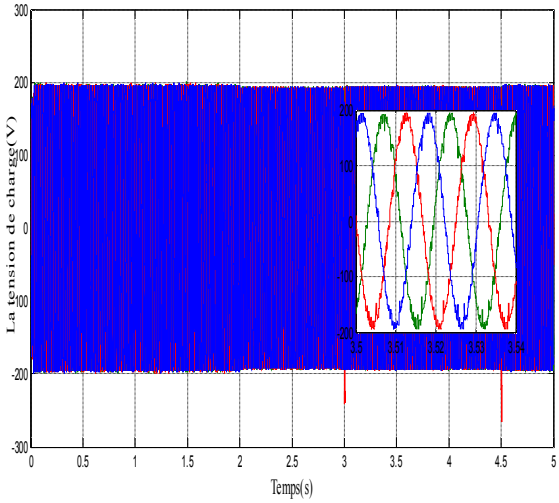



Figure IV. 54 Le courant AC de charge

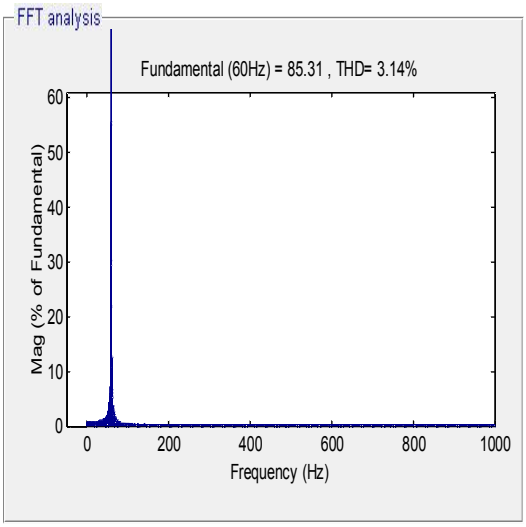



Figure IV. 55 Les harmoniques de courant

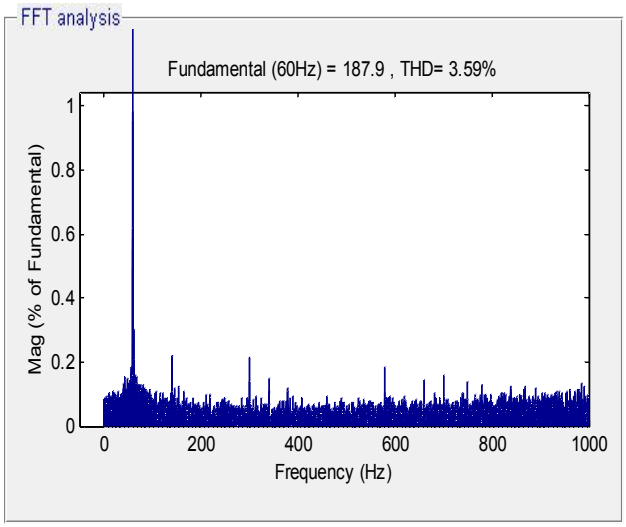



Figure IV. 56 Les harmoniques de tension

## IV. 6 Comparaison des résultats

Le tableau IV. 2 montre les résultats obtenus à partir le système PV, système WECs et les différents systèmes d'hybridation pour différentes conditions temporelles. D'après les résultats présentés au tableau (4) ; les systèmes hybrides donnent des énergies plus stables que les systèmes individuels,

Le système à un MPPT commun minimise le nombre total de convertisseurs, que signifie la diminution des pertes présents à chaque convertisseur. En résulte, ce système donne plus d'énergie que les autres systèmes (1Kw en plus). Mais, il présente des oscillations considérables avec une grande dépendance entre les deux systèmes à cause de l'utilisation de seul contrôle MPPT.

Le système à bus AC et le système DC avec MPPT individuels, donnent presque les mêmes résultats de puissances, alors que le deuxième système est préférablement utilisé dans le bâtiment pour minimiser le nombre des convertisseurs utilisés ce que diminuer le prix de l'installation.

Tableau IV. 2 Puissances de sortie obtenues à partir du PV, du WECs et du système hybride (a, b), système AC

| Temps(s) | t=1s | | t=2.3s | | t=2.7s | | t= 3.5s | | t=4.7s | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P. (kW, kVAR) | P | Q | P | Q | P | Q | P | Q | P | Q |
| PV | 50.15 | 1.568 | 49.74 | 0.36 | 29.97 | 0.107 | 60.747 | 0.992 | 39.76 | 0.735 |
| WECs | 50.06 | 1.671 | 40.48 | 0.197 | 37.44 | 0.209 | 31.492 | 0.355 | 30.73 | 0.286 |
| Hybride (a) | 53.71 | 1.863 | 46.47 | 0.211 | 35.01 | 0.019 | 50.05 | 0.722 | 35.03 | 0.37 |
| Hybride (b) | 54.50 | 2.097 | 47.74 | 0.311 | 36.38 | 0.033 | 50.372 | 1.133 | 35.51 | 0.41 |
| Hybride( AC) | 53.75 | 1.981 | 45.60 | 0.188 | 35.12 | 0.095 | 50.185 | 0.998 | 35.04 | 0.382 |

Le THD de chaque système est donnée dans le tableau (IV. 3). Tous les THD sont inférieur à 5%, qui montrent l'efficacité des contrôles utilisés. Ces valeurs sont proches mais, le meilleur THD est obtenu par le système hybride à bus AC (3.14%).

Tableau IV. 3 THD de chaque système

| THD(%) | PV | WECS | Hybride(a) | Hybride(b) | Hybride(AC) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 3.25 | 3.32 | 3.26 | 3.29 | 3.14 |

## VI. 7 Conclusion

L'intégration des énergies renouvelables dans les zones urbaines est une étape essentielle pour leur développement durable et surtout pour éviter l'émission de gaz à effet de serre produite par les énergies traditionnelles.

Dans ce chapitre, on a proposé l'intégration d'un système hybride qui combine le système éolien et le système photovoltaïque dans les villes connecté au réseau électrique pour bien profiter les deux sources simultanément à fournir une énergie plus stable. Pour cela, trois architectures d'hybridation sont présents ; un système hybride à un bus DC avec des MPPT individuels, un système hybride à un bas DC avec un MPPT commun et un système hybride à une connexion AC. Les trois systèmes hybrides sont simulés sous MATLAB/Simulink pour tester leurs efficacités et performances pour les différentes variations de conditions climatiques et de charge. Une étude comparative est établie entre les deux systèmes individuels (photovoltaïque, éolien) et les trois systèmes hybrides. Les résultats de simulations prouvent l'efficacité du système hybride à fournir une énergie plus stable par rapport aux systèmes individuels avec meilleurs performances. L'utilisation de contrôleurs MPPT individuels augment la fiabilité et les performances du système hybride par rapport au système hybride avec un seul contrôleur MPPT. Le système à bus AC et le système à MPPT individuels présentent les meilleures performances par rapport au système à MPPT commun, qu'ils ont des résultats très proches. L'installation de ce système hybride à MPPT individuels est préférablement utilisée dans les bâtiments pour minimiser le nombre des convertisseurs utilisés et donc minimiser le prix total de l'installation.

# Conclusion Générale

# Conclusion générale

Pour réduire l'émission de gaz à effet de serre et l'échauffement de la planète, l'utilisation des énergies renouvelables est mise en place depuis quelque années pour remplacer les énergies fossile et fissile qui se raréfient de plus en plus.

Les travaux présentés concernent, l'étude, la modélisation et la simulation des systèmes d'énergies renouvelables; le système photovoltaïque, le système éolien et l'hybridation de ces deux systèmes (éolien /PV) par différentes topologies pour faire une étude comparative afin de fournir une énergie plus stable avec les meilleurs performances. Tous les systèmes sont connectés au réseau électrique et adaptable à l'intégration aux zones urbaines.

Pour se faire, un état de l'art sur les différents types d'énergies renouvelables avec leurs potentiels énergétiques dans le monde et particulièrement en Algérie, est présenté avec les différentes structures d'hybridation de ces énergies renouvelables en présence ou absence des énergies traditionnelle.

Pour le générateur photovoltaïque, nous avons étudié les caractéristiques de panneau solaire sous l'influence de l'éclairement et la température avec les différents types de cellules solaire existants, les différents types d'onduleur utilisés de connexion au réseau possibles. Pour la chaine de conversion photovoltaïque, la modélisation de tous les composants a constituant est détaillée avec la logique floue pour suivre le point de puissance maximale, la commande vectorielle pour contrôler la puissance injecter au réseau électrique et la représentation des résultats de simulation sous l'influence de variation de la température et l'ensoleillement.

Concernant la chaîne de conversion éolienne, on a représenté le modèle avec tous ses éléments: l'aérogénérateur, générateur à aimants permanents, le redresseur à diode et le hacheur commandé. La logique floue est utilisée ici pour suivre le point de puissance maximale avec un réglage de l'angle de calage des pales pour sécuriser la turbine contre les vitesses du vent fort. Les résultats de simulation d'un parc éolien terrestre sont présentés pour confirmer l'efficacité des contrôles utilisés vis-à-vis aux variations du vent et de la charge.

Dans le quatrième chapitre, une discussion sur l'intégration de ces énergies dans les villes est discutée avec les différentes nouvelles technologies utilisées. Ensuite, plusieurs topologies

d'hybridation de ces deux source renouvelables (éolienne/ photovoltaïque) sont fait pour faire une comparaison entres ces performances. Les topologies présentées sont ; système hybride à bus DC à MPPT individuels, à un MPPT commun et un système hybride à bus AC. Enfin, une étude comparatives entres les trois topologies de combinaison et les deux systèmes à une seule source d'énergie renouvelable est détaillée.

Les résultats de simulations prouvent ; l'efficacité des contrôles utilisés ; la logique floue à bien suivre le point de puissance maximale, l'efficacité de la commande vectorielle à bien gérer les puissances injecter au réseau électrique. L'efficacité de système hybride à donner une énergie plus stable qu'un système à une seule source d'énergie renouvelable. Le système hybride à bus AC et le système DC à MPPT individuels, donnent des résultats proches avec des meilleures performances d'hybridation que le système hybride DC à MPPT commun.

Ce travail offre quelques perspectives:

- Envisager une réalisation pratique du système d'énergie hybride proposé
- Etude de système autonome avec un système de stockage pour l'installation aux zones rurales.
- Application des autres commandes avec une étude comparative

# Bibliographie

[1] F. Adamo, F. Attivissimo, A. Di Nisio, and M. Spadavecchia, Characterization and Testing of a Tool for Photovoltaic Panel Modeling, IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 60, no. 5, pp. 1613–1622, 2011.

[2] https://www.connaissancedesenergies.org/bp-statistical-review-world-energy-2021-les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-220218

[3] M. Messouad, Modélisation et optimisation de systèmes de protection d'énergies renouvelables couples au réseau, thèse de doctorat, université de Constantine, 2012.

[4] M. S. Nipon Ketjoy, Photovoltaic Hybrid Systems for Rural Electrification in the Mekong Countries, thèse de doctorat, université de Kassel. 2005.

[5] L. Bridier, Modélisation et optimisation d'un système de stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente, thèse de doctorat, Université de la Réunion, France, 2016.

[6] I. Salhi, s. Douadi, N. esoumbouli, A. H amzaoui, application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hybro-electrical power plant, renewable energy, vol. 35, no. 9, pp. 2071-2079, 2010.

[7] S. T. Fadoul, power management and control strategies of renewable energy resources for micro-grid application, thèse de doctorat, université de québec, montreal, 2017.

[8] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and Adrian V. Timbus, Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 5, 2006.

[9] P. Breeze, Power Generation Technologies (Third Edition), Chapter 13 - Solar Power, Newnes, 2019.

[10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal

[11] H. Menemmeche, M. Abderrezek and A. Ahriche, Performances of Photovoltaic Modules Function in an Aggressive Environment, Experimental Study, Journal of Engineering Science and Technology Review, vol.15, no. 4, pp. 60–66, 2022.

[12] V. K. Garg, S. Sharma, Hardware implementation of wind turbine emulator and its integration with utility grid, Journal of Electrical Systems, vol. 18, no. 3, pp. 331-342, 2022.

[13] T. Ghennam, Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation, thèse de doctorat, école militaire polytechnique d'Alger, 2011.

[14] https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie

[15] H. Kasbadji Merzouk, Evaluation du Gisement Energétique Eolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2006.

[16] V. C. Nelson, Ken L. Starcher, R. E. Foster, R. N. Clark, D. Raubenheimer, Wind hybrid systems technology characterization, université de Vista, 2002.

[17] M. Tiar, commande optimale d'un système de génération photovoltaïque hybride, thèse de magister, université de Biskra, 2011.

[18] M. M. Y. Aysar, Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell structures, thèse de doctorat, université Degli Studi di Catania Scuola Superiore di Catania, 2012.

[19] I. Vechiu, modelisation et analyse de l'integration des energies renouvelables dans un reseau autonome, thèse de doctorat, universite de Havre, 2005.

[20] S. Edalati, M. Ameri, M. Iranmanesh, Comparative performance investigation of mono- and poly-crystalline silicon photovoltaic modules for use in grid-connected photovoltaic systems in dry climates, Applied Energy. vol. 160, pp. 250-265, 2015.

[21] S. Benhalima, modélisation et contrôle des systèmes éoliens-solaire intégrés au réseau VSC-HVDC, thèse de doctorat, université du Québec, Montréal, 2019.

[22] V. Benamara, étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage, thèse de doctorat, université de Québec, 2012.

[23] E. M. Natsheh**,** Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial Intelligence, these de doctorat, université de Manchester Metropolitan, 2013.

[24] M. Telidjane, Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic, thèse de doctorat, université de Lyon, 2017.

[25] A. Meskani, A. Haddi, O. Kamach, Modélisation et Simulation d'un Système PV Intégré un Réseau BT par la Méthode Du Watt-Var découplé, International journal of control energy and electrical engineering (CEEE), 2014.

[26] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.

[27] M. A. Camara, Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs, thèse de doctorat, université de Paris Est Créteil, 2011.

[28] B. N. Yannick, Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement, 2012.

[29] J. f. Sultani, Modelling, design and implementation of d-q control in single-phase grid-connected inverters for photovoltaic systems used in domestic dwellings. These de doctorat, université de Montfort, UK, 2013.

[30] J. Yoo, B. Park, K. An, E. A. Al-Ammar, Y. Khan, K. Hur, J. H. Kim, Look-Ahead Energy Management of a Grid-Connected Residential PV System with Energy Storage under Time-Based Rate Programs, Energies, vol. 5, no. 4, pp.1116–1134, 2012.

[31] W. Omran, Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems, these de doctorat, université de Waterloo, Canada, 2010.

[32] A. El-M. Metwally Metwally Aly Abd El-Aal, Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System, University of Kassel, Germany, 2005.

[33] F. Blaabjerg and K. Ma, Future on power electronics for wind turbine systems, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 3, pp. 139-152, 2013.

[34] C Lishou, Etude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes photovoltaïques à stockage d'énergie. Application à la Sûreté de Fonctionnement de centrales solaires hybrides, thèse de doctorat à Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 1998.

[35] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, thèse de doctorat, l'École Normale Supérieure de Cachan, 2002.

[36] K. Soon Tey and S. Mekhilef, Modified Incremental Conductance Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions and Load Variation, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 61, no. 10, pp. 5384-5392, 2014.

[37] M. H. Quang, optimization de la production de l'énectrcité renouvelable pour site isolé, thèse de doctorat, université de reims champagne, ardenne, France, 2013.

[38] M. K. Sharma, D. Kumar, S. Dhundhara, D. Gaur, and Y. P. Verma, Optimal tilt angle determination for PV panels using real time data acquisition, Global Challenges, vol. 4, no. 8, pp. 1-12, 2020.

[39] https://medium.com/@solarify/which-direction-must-solar-panels-face-and-what-angle-should-they-be-tilted-at-7242c671e4b9

[40] M. R. Rouas, étude d'un système hybride éolien-photovoltaïque, thèse de doctorat, université de Tizi Ouzou, 2018.

[41] J. Gosumbonggot and G. Fujita, Partial Shading Detection and Global Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic with the Variation of Irradiation and Temperature, Energies, vol.12, no. 202, pp.1- 22, 2019.

[42] Ma. T. Vatcheme, modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien, thèse de magister, université du Québec en abitibi tmiscamingue, 2019.

[43] Y. Zhu , J. Fei, Adaptive Global Fast Terminal Sliding Mode Control of Grid-connected Photovoltaic System Using Fuzzy Neural Network Approach, IEEE Access, vol. 5, pp. 9476–9484, 2017.

[44] F. Zaouche, Maximisation de puissance des systèmes photovoltaïques, thèse de doctorat, université de Bejaia, 2018.

[45] Z. Bouguerra and A. Benfdila, Comparative Study of Individual and Hybrid Renewable Energy Systems (Photovoltaic, Wind Energy and Hybridization). Controlled by Fuzzy Logic Control, Journal of Engineering Science and Technology Review, vol.14, no. 5, pp. 180 – 186, 2021.

[46] K. Kumar, N. Ramesh Babu, K.R. Prabhu, Design and Analysis of RBFN Based Single MPPT Controller for Hybrid Solar and Wind Energy System, IEEE Access, vol. 5, pp. 15308 –15317, 2017.

[47] A. Borni, étude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique, thèse de doctorat, université de Constantine, 2015.

[48] H. A. Attia, F. D. Gonzalo, Stand-alone PV system with MPPT function based on fuzzy logic control for remote building applications, International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 10, no. 2, pp. 842-851, 2019.

[49] M. Ahmed, I. Harbi, R. Kennel, J. Rodríguez, M. Abdelrahem. Evaluation of the Main Control Strategies for Grid-Connected PV Systems. Sustainability, vol. 14, no. 18, pp. 11142, 2022.

[50] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodr iguez, grid converters for photovoltaic and wind power systems, Book, UK, vol. 29, Wiley, 2011.

[51] Freijedo, F. D., A. G. Yepes, O. Lopez, P. Fernandez-Comesana, J. Doval-gandoy, An optimized implementation of phase locked loops for grid applications. IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 60, no. 9, pp. 3110–3119, 2011.

[52] Y. Jiang, Y. Li, Y. Tian and L. Wang, Phase-Locked Loop Research of Grid-Connected Inverter Based on Impedance Analysis, Energies 2018, vol.11, no. 11, p. 3077, 2018.

[53] A. Abdelli, optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2007.

[54] A. Mericki, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2005.

[55] M. K. Idjdarene, Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes, thèse de doctorat, université de Béjaia, 2010.

[56] L. Leclerq, apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat, université de Lille, 2004.

[57] C. Guzman, étude de topologies et gestion d'un système d'énergies renouvelables multi-sources, thèse de magister, université de Québec, 2013.

[58] S. Lundberg, Wind Farm Configuration and Energy Efficiency Studies - Series DC versus AC Layouts, these de doctorat, université de Goteborg, Sweden 2006.

[59] D. Guérette, asservissement d'une éolienne vitesse variable et pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel haute pénétration, thèse de magister, 2010.

[60] S. Azzouz, amélioration de la commande d'un système éolien a base d'une machine mada utilisant les techniques intelligentes, thèse de doctorat, université de m'sila, 2019.

[61] M. A Hassad, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux, thèse de magister, université de Sétif, 2012.

[62] M. M. Mouhammad Al anfaf, contribution a la modélisation et a l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multichargés, l'université de Lorraine, 2017.

[63] N. Khezami, Commande multi6modèle optimale des éoliennes : application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence, thèse de doctorat, école centrale de Lille, 2012.

[64] H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi, DPC Based on ANFIS Super-Twisting Sliding Mode Algorithm of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy System, Journal Européen des Systèmes Automatisés , vol. 53, no. 1, pp. 69-80, 2020.

[65] Sh. Xiao, G. Yang, H. Zhou and H. Geng,, A LVRT Control Strategy based on Flux Linkage Tracking for DFIG-based WECS, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 7, pp.2820-2832, 2013.

[66] H. Li, Z. Chen, Overview of different wind generator systems and their comparisons, IET Renewable Power Geneation. vol. 2, no. 2, pp. 123–138, 2008.

[67] A. M. Howlader, T. Senjyu, and A. Yousuf Saber, An Integrated Power Smoothing Control for a Grid-Interactive Wind Farm Considering Wake Effects, IEEE systems journal, vol. 9, no. 3, pp. 954- 965, 2015.

[68] H. Shariatpanah, R. Fadaeinedjad, and M. Rashidinejad, A New Model for PMSG-Based Wind Turbine With Yaw Control, IEEE transactions on energy conversion, vol. 28, no. 4, pp. 929- 937, 2013.

[69] N. Cherfia, Etude d'une Chaine de Conversion de l'Energie Eolienne, thèse de doctorat, université de Constantine, 2018.

[70] A. Davigny, participation aux services système de ferme éolienne à vitesse variable intégrant un système du stockage inertiel d'énergie, thèse de doctorat, université de Lille, 2007.

[71] D. Djemati, étude de l'écoulement autour d'une éolienne de type savonius, Simulation des performances de l'éolienne. Simulation, thèse de magister, université de Batna, 2011.

[72] M. Carrasco, L. Garcia Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. GalvÆn, Ramn C. Portillo Guisado, M. angeles Martn Prats, , José Ignacio Len, and N. Moreno-Alfonso, Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 4,. pp 1002-1016, 2006.

[73] P M. Koumba, contribution l'étude et la commande des éoliennes génératrices synchrones dédies aux réseaux électriques autonomes, thèse de doctorat, université de Quebec, 2019.

[74] F. Fateh, W. N. White, D. Gruenbacher, A Maximum Power Tracking Technique for Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines, IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, vol. 3, no.4, pp. 957-966, 2015.

[75] F. Saadi, Commande d'un Convertisseur Électromécanique Application à un Système Éolien, thèse de magister, université de Constantine, 2013.

[76] F. Poitiers, étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat, université de Nantes, 2003.

[77] S. El aimani, modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension, thèse de doctorat, université de Lille, 2004.

[78] H. Camblong, minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, bordeaux, France, 2003.

[79] M. Stiebler, wind energy system for power generation, book, Green Energy and Technology, 2008.

[80] M., Pucci, M. Cirrincione, Neural MPPT control of generators with induction machines without speed sensors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 37–47, 2011.

[81] N. Bouaziz, A. Benfdila , A. Lakhlef, A model for predicting photovoltaic module performances, International Journal of Power Electronics and Drive System, vol. 10, no. 4, pp. 1914- 1922, 2019.

[82] S. Radhan, B. Singh, B. K. Panigrahi, S. Murshid. A Composite Sliding Mode Controller for Wind Power Extraction in Remotely Located Solar PV, Wind Hybrid System, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 66, vol. 7, pp. 5321–5331, 2019.

[83] A. Khlaief, Contribution à la commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants permanents (MSAP), thèse de doctorat, université de D'AIX-Marseille, France, 2012.

[84] I. U. Haq, Q. Khan, I. Khan, R. Akmeliawati, K. S. Nisar and I. Khan, Maximum power extraction strategy for variable speed wind turbine system via neuro adaptive generalized Global sliding mode controller, IEEE access, vol. 8, pp. 128536–128547, 2020.

[85] R. A. Ibrahim and N. E. Zakzouk, A PMSG Wind Energy System Featuring Low-Voltage Ride-through via Mode-Shift Control, Applied Science. vol. 12, pp. 964. 2022.

[86] N. Tidjani, A. Guessoum, Augmented robust T-S fuzzy control based PMSG wind turbine improved with H8 performance, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 12, no. 1, pp. 585–596, 2021.

[87] I. Ui Haq, Q. Khan, I. Khan, R. Akmeliawati, K. Soopy Nisar, I. Khan, Maximum Power Extraction Strategy for Variable Speed Wind Turbine System via Neuro-Adaptive Generalized Global Sliding Mode Controller, IEEE Access, vol. 8, pp. 128536 – 128547, 2020.

[88] B. Majout, B. Bossoufi, M. Bouderbala, M. Masud, J.F. Alamri, M. Taoussi, M. Elmahfoud. Improvement of PMSG based wind energy conversion system using developed sliding mode control. Energies, vol. 15, no. 5. pp.1625, 2022.

[89] Y. Zhao, C. Wei, Z. Zhang, W. Qiao, A Review on Position/Speed Sensorless Control for Permanent-Magnet Synchronous Machine-Based Wind Energy Conversion Systems, IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, vol. 1, no. 4, 2013.

[90] Soteris A. Kalogirou, Building integration of solar renewable energy systems towards zero or nearly zero energy buildings, International Journal of Low-Carbon Technologies, vol. 10, pp. 379–385, 2015.

[91] B. Benlahbib, N. Bouarroudj, S. Mekhilef, T. Abdelkrim, A. Lakhdari, A. Bouchafaa, A Fuzzy Logic Controller Based on Maximum Power Point Tracking Algorithm for Partially Shaded PV Array-Experimental Validation, elektronika ir elektrotechnika, vol. 24, no. 4, pp. 38- 44, 2018.

[92] L. Wang, X. Xue, Y. Shi, Z. Wang, Z., A. Ji, A Dynamic Analysis to Evaluate the Environmental Performance of Cities in China, Sustainability, vol. 10, no. 3, pp. 862-878, 2018.

[93] T. Ramesh, R. Prakash, K. K Shukla, Life cycle energy analysis of buildings: An overview. Energy Build, vol. 42, pp. 1592–1600, 2010.

[94] K. Tazi, M. F. Abbou, F. Abdi, Performance analysis of micro-grid designs with local PMSG wind turbines, Energy Systems, vol. 11, pp. 607–639, 2020.

[95] S. Samal, P. K. Hota, Design and analysis of solar PV-fuel cell and wind energy based microgrid system for power quality improvement, Cogent Engineering, vol.4, no. 1, 2017.

[96] K. P. Cho, S. H. Jeong, D. P. Sari, harvesting wind energy from aerodynamic design for building integrated wind turbines, International Journal of Technology, vol. 3, pp. 189-198, 2011.

[97] D. P. Sari, W. B. Kusumaningrum, A Technical Review of Building Integrated Wind Turbine Systemand a Sample Simulation Model in Central Java, Indonesia, Conference and Exhibition Indonesia Renewable Energy & Energy Conservation, Indonesia , 2013.

[98] M. lopez, contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée, thèse de doctorat, université de paris sud 11, France, 2008.

[99] M. Nfaoui, K. El-Hami Extracting the maximum energy from solar panels, energy report, vol. 4, pp. 536-545, 2018.

[100] Ch. Peng, Y. Huang, Z. Wu, Building-integrated photovoltaic (BIPV) in architectural design in China, energy and building, vol. 43, pp. 3592-3598, 2011.

[101] B. P. Jelle, Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways, Energies, vol. 9, no. 21, 2016.

[102] A. Al-Badi, H. Bourdoucen. Feasibility analysis of renewable hybrid energy supply options for Masirah Island. Int J Sustain Eng, vol. 5, pp. 244–51, 2011.

[103] H. Belmili, M. Haddidi, S. Becha, M. F. Almi and B. Bendib, Sizing stand-alone photovoltaic–wind hybrid system: Technoeconomic analysis and optimization. Renew Sustain Energy Rev, vol. 30, pp. 821– 32, 2014.

[104] J. Lee, J. Park, H. J. Jung and J. Park, Renewable Energy Potential by the Application of a Building Integrated Photovoltaic and Wind Turbine System in Global Urban Areas, Energies, vol. 10, no. 2158, 2017.

# Annexe

Paramètres de module photovoltaïque

| **Module photovoltaique KC200GT** | |
|---|---|
| Puissance maximale($P_{max}$) | 200 $W/m^2$ |
| Tension à Pmax (Vmp) | 26.3V |
| Courant à Pmax($I_{mp}$) | 7.61A |
| Tension à circuit ouvert ($V_{cc}$) | 32.9V |
| Courant à court circuit($I_{sc}$) | 8.21A |
| Coefficient de courant/température ($K_v$) | $3.18*10^{-3}A/C^{\circ}$ |
| Coefficient de Tension/température ($K_i$) | $-1.23*10^{-1}V/C^{\circ}$ |
| Nombre de cellules en série | 54 |

Paramètres de système éolien

| **wind turbine** | |
|---|---|
| power | 8.5kW |
| **PMSG** | |
| Nombre de paire de pôles (p) | 5 |
| La résistance de stator ($R_s$) | 0.425 Ω |
| Inductance ($L_s$) | 0.0082 H |
| Coefficient de frottement ($K_r$) | 0.001189Nms |
| Inertie (J) | $0.01197kg.m^2$ |

**Résumé**

Ce travail détaille la modalisation et la simulation de système photovoltaïque, de système éolien et trois topologies d'hybridation de ces sources photovoltaïque et éolienne, dont le but essentiel est de faire une étude comparative entre tous les systèmes et encourager leurs intégrations dans les zones urbaines pour satisfaire la demande énergétique croissante et atteindre un développement plus durable. Pour ce faire, la modélisation et la simulation de chaque système est se réalisée indépendamment. Pour le système PV, le générateur PV est connecté à un hacheur qui fait la commande par la logique floue pour suivre le point de fonctionnement maximale, ce dernier est connecté au réseau via un onduleur et un filtre RL. Le système éolien est à la base d'un génératrice synchrone à aiment permanant (GSAP), connecté à un onduleur à travers un redresseur à diode et un hacheur contrôlé par la logique floue pour atteindre la puissance maximale disponible au vent, avec un système de réglage de l'ongle d'orientation des pales pour mobiliser la turbine selon la direction et la vitesse de vent afin de la sécurisée. Pour le système hybride, plusieurs topologies sont appliqués ; la première est une combinaison à bus CC avec un MPPT individuels, les sources PV et éolien sont connectés à un onduleur commun à travers des hacheurs individuels pour maximiser la puissance par la logique floue. La deuxième architecture est encore une combinaison à bus DC mais avec un MPPT commun, les deux systèmes sont connectés à l'onduleur à l'intermédiaire d'un seul hacheur. La troisième topologie est la connexion de deux système à un bus AC, chaque système a un hacheur et un onduleur personnel. La même commande est appliquée pour contrôler les puissances active et réactive séparément. Un filtre RL est associé pour minimiser les harmoniques de courant et tension injecté au réseau électrique. Les performances de chaque système ont été testées pour différents variation de conditions métrologiques (température, ensoleillement, vitesse de vent) et de variation de la charge. Les résultats de simulation sont représentés qui confirment l'efficacité de système hybride à fournir une énergie plus fiable que les systèmes individuels. Le système hybride à bus AC et le système à bus DC avec MPPT individuels sont plus robuste que le système à bus DC avec un MPPT commun. L'efficacité des contrôles appliqués ; la logique floue à suivre le point de puissance maximale, le contrôle de bus DC à stabiliser la tension continue et la commande vectorielle à garantir un facteur de puissance unitaire.

Mots clés : système photovoltaïque, système éolien, système hybride, GSAP, la logique floue, la commande vectorielle

**Abstract**

This work details the modeling and simulation of photovoltaic system, wind system and three topologies of hybridization of these photovoltaic and wind sources, whose main purpose is to make a comparative study between all the systems and further encourage their integration in urban areas to meet the growing energy demand and achieve a more sustainable development. To do this, the modeling and simulation of each system is performed independently. For the PV system, the PV generator is connected to a chopper that controlled by fuzzy logic control to follow the maximum operating point, the system is connected to the grid via an inverter and a RL filter. The wind system is based on a permanent magnet synchronous generator (PMSG), connected to inverter through a diode rectifier and a chopper controlled by fuzzy logic to track the maximum power available in the wind, with a pitch angle control to mobilize the turbine according to the direction and speed of wind to secure it. For the hybrid system, several topologies are applied; the first one is a DC bus combination with individual MPPT, the PV and wind sources are connected to a common inverter through individual choppers to maximize the power through fuzzy logic. The second architecture is still a DC bus combination but it has a common MPPT, both systems are connected to the inverter through a single chopper. The third topology is the connection of two systems to AC bus; each system has a chopper and a personal inverter. The same control is applied to control the active and reactive power separately. A RL filter is associated to minimize the current and voltage harmonics injected to the electrical grid. The performance of each system has been tested for different metrological conditions (sunlight, wind speed) and load variation. Simulation results are shown that confirm the effectiveness of the hybrid system in to provide more reliable power than individual systems. The hybrid AC bus system and the individual MPPT system are more robust than the system with a common MPPT. The effectiveness of the applied controls; fuzzy logic to track the maximum power point, DC bus control to stabilize the DC voltage and vector control to ensure unity power factor.

Keywords: photovoltaic system, wind system, hybrid system, PMSG, fuzzy logic, vector control