

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Frères Mentouri Constantine 1
Faculté Des Sciences de La Technologie
Département D'électronique



N° de série :

N° d'ordre :

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences
Spécialité: Électronique

Présentée et soutenue publiquement par

Soualmia Adel

Thème :

*Amélioration de la Chute de Tension sur
Réseau BT par l'apport d'un Générateur
Hybride PV/Eolien*

Devant le jury :

Président	Kerrour Foued	Professeur	Université frères Mentouri-Constantine 1
Rapporteur	Chenni Rachid	Professeur	Université frères Mentouri-Constantine 1
Examineurs	Kerbache Tahar	Professeur	Université frères Mentouri-Constantine 1
	Toufouti Riad	Professeur	Université Cherif Messadia, SoukAhras
	Mordjaoui Mourad	Professeur	Université 20 Aout, Skikda

Année Universitaire : 2019-2020



Remerciement

J'aimerais, avant toute chose, remercier messieurs Pr Kerrour Foued président de jury, Pr Kerbache Tahar, Pr Toufouti Riad et Pr Mordjaoui Mourad, membres de jury pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury de thèse. Partager et de discuter de mes travaux en leur compagnie a été un plaisir.

Je suis également redevable envers mon encadrant de thèse. Je remercie donc chaleureusement Pr :Chenni Rachid, mon directeur de thèse, pour tous ses conseils avisés dans la direction de ces travaux. Sa bienveillance et son sens de l'humour ont sans conteste égayé ces cinq années de travaux de thèse qui émanait de nos salles ont contribué à ce que je garde un moral à toute épreuve, et ce même lors des creux de motivation caractéristiques de tout travail de recherche.

Enfin je remercier également tout les professeurs pour leur excellents enseignements et pour leur appui lors des étapes cruciales de ma carrière.

Je voudrais remercier infiniment ma famille pour tous les encouragements et le soutien qu'ils su m'apporter. Je leur serai éternellement reconnaissant pour les sacrifices qu'ils ont consentis afin de me donner la chance d'en arriver aujourd'hui, à la conclusion de la rédaction de mes remerciements de thèse.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- La mémoire de mon père,
- A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ma mère, ma femme
- Mes chers frères et mes chères sœurs
- Tous mes amis.

ABSTRACT—Voltage drop at the ends of a grid is a paramount concern of the electrical distributor. In a urban low-voltage network, the voltage quality will be unacceptable when voltage drop surpasses 5%. Among techniques used to ameliorate the network quality, setup of new MV / LV substations, strengthening the sections of the conductors. The connection of the hybrid PV-wind turbine mini power station to the power grid is a promise solution to offset the deficit point voltage. In this thesis, a concrete case study of connection-impact of energy based on a hybrid PV-wind turbine mini power station on rural LV network is presented. The LV network located in the in the daïra of Heddada located in Souk Ahras, north east Algeria is studied.

Keywords—Voltage drop, LV network, PV-Wind, Impact.

RESUME — La chute de tension aux extrémités d'un réseau est une préoccupation primordiale du distributeur électrique. Dans un réseau urbain à basse tension, la qualité de la tension sera inacceptable si la chute de tension dépasse 5%. Parmi les techniques utilisées pour améliorer la qualité du réseau, la mise en place de nouvelles sous-stations MT / BT, le renforcement des sections des conducteurs. La connexion de la mini-centrale hybride PV-éolienne au réseau électrique est une solution prometteuse pour compenser la tension ponctuelle en déficit. Dans cette thèse, nous présentons une étude de cas concrète d'impact de la connexion sur l'énergie basée sur une mini-centrale hybride PV-éolienne sur un réseau BT en zone urbain. Le réseau BT situé dans la daïra de Heddada situé à Souk Ahras, au nord-est de l'Algérie, est étudié.

Mot Clé : Chute de tension, Réseau BT, PV-Eolien, Impact .

المخلص — يمثل انخفاض الجهد في نهايات الشبكة أحد الشواغل الرئيسية لموزع الكهرباء. في شبكة الجهد المنخفض في المدن ، تكون جودة الجهد غير مقبولة عندما يتجاوز انخفاض الجهد 5 ٪. من بين التقنيات المستخدمة لتحسين جودة الشبكة ، نذكر إعداد المحطات الفرعية MT / BT الجديدة ، وتعزيز أقسام الموصلات. يُعد توصيل المحطات الهجينة الصغيرة ذات المولدات الكهروضوئية و التوربينات الهوائية بشبكة الطاقة حلاً وعدًا لموازنة جهد نقطة العجز. في هذه الرسالة ، تم تقديم دراسة حالة ملموسة لتأثير توصيل الطاقة استنادًا إلى محطة توليد طاقة صغيرة هجينة المكونة من المولدات الكهروضوئية و التوربينات الهوائية في شبكة الجهد المنخفض في المدينة. حيث تم دراسة شبكة BT الموجودة في دائرة الحدادة ولاية سوق أهراس ، شمال شرق الجزائر.

الكلمات المفتاحية : السقوط في الجهد ، شبكة منخفضة الجهد ، كهروضوئي-طاقة رياح ، التأثير .

Liste de publications relatives à la thèse

1-Publications Internationales :

[1]Adel Soualmia , Rachid Chenni , Comparative Study of Three Algorithms (MPPT) Applied to Photovoltaic Systems, International Journal of Innovation and Applied Studies , Vol. 26 No. 4 Jul. 2019, pp. 1147-1158.

[2]Soualmia.adel, Chenni.Rachid Performance Analyses Of Grid-Connected Photovoltaic Power System, Revue Des Energies Renouvelables Vol. 21 N°4 (2018) 623 – 634.

[3] Soualmia, A., & Chenni, R. (2016, December). A Survey Of Maximum Peak Power Tracking Techniques Used In Photovoltaic Power Systems. In 2016 Future Technologies Conference (FTC)(pp. 430-443). IEEE.

2-Conférences Internationales :

[4] Soualmia.adel, Chenni.Rachid, , « Performance Assessment Of Grid-Connected Solar Photovoltaic Power Plant In Souk Ahras-Algeria 2nd International Conference On Technological Advances In Electrical Engineering Skikda , Algeria, (Ictae'16.), 24-26, October 2016 .

[5]Soualmia, A., & Chenni, R. (2016, November) . Modeling And Simulation Of 15MW Grid-Connected Photovoltaic System Using Pvsyst Software. In 2016 International Renewable And Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 702-705). IEEE.

[6]Soualmia.adel, Chenni.Rachid, " : Modeling And Simulation Of Photovoltaic Production Losses 7th International Conference : Sciences Of Electronics, Technologies Of Information And Telecommunication (SETIT'16), Hammamet, Tunisia18th-20th December 2016.

[7]Soualmia.adel, Chenni.Rachid, " : Sizing And Simulation Of Photovoltaic Pumping Using Software Pvsyst 7th International Conference: Sciences Of Electronics, Information And Telecommunication Technologiesof (SETIT'16), Hammamet, Tunisia18th-20th December 2016.

3-Conférences Nationales :

[8]Soualmia.adel, Chenni.Rachid, Amélioration De La Chute De Tension Dans Un Réseau Basse Tension Par L'apport D'un Générateur Hybride PV-Eolien Séminaire National Sur Les Procédées Industriels Et L'economie D'energie Université Echahid Hamma Lakhder El-Oued 10-11 Octobre2016.

Sommaire

Remerciements**Deidicaces****Resumé de la thèse****Liste des publications****Sommaire****Liste des figures****Liste des tableaux****Listes des acronymes et symboles****Introduction générale** **i*****Chapitre 01 : État de l'art sur les réseaux d'énergie électrique et l'intégration de la production décentralisée à base des énergies renouvelables***

1. 1. Introduction	3
1.2. Fonctionnement des systèmes électriques	3
1.2.1. Organisation physique	3
1.2.2. Niveaux de tension	5
1.3. Réseau électriques de distribution	5
1.3.1. Réseaux de distribution à moyenne tension(MT)	5
1.3.2. Réseaux de distribution basse tension (BT)	5
1.3.3. Caractéristiques techniques générales	6
1.4. Integration de génération d'énergie distribuée dans le réseau de distribution électrique	7
1.4.1. Génération d'énergie distribuée	7
1.4.1.1. Définition	7
1.4.1.2. Différents types de génération d'énergie distribuée à base d'énergie renouvelable	8
1.4.1.2.a.Production de l'énergie électrique d'origine solaire	8
1.4.1.2.b.Production de l'énergie électrique d'origine éolienne	9
1.4.1.2.c.Production de l'énergie électrique d'origine biomasse	9
1.4.1.2. d.Production de l'énergie électrique d'origine géothermique	10
1.4.1.2.e.Production de l'énergie électrique d'origine hydraulique	10
1.4.1.2.f.Production de l'énergie électrique d'origine marine	10
1.5. Utilisation de l'energie renouvelable	11
1.5.1. Systèmes raccordés au réseau	11
1.5.2. Systèmes autonomes	11
1.6. Avantage des énergies renouvelables	12
1.7. Inconvénients des énergies renouvelables	12

1.8. Conclusion	13
<i>Chapitre 02 : Système de production d'électricité photovoltaïque</i>	
2.1.Introduction	20
2.2. Historique	21
2.3.L'effet photovoltaïque	21
2.4. Le générateur photovoltaïque	22
2.4.1. La cellule photovoltaïque	22
2.4.2. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque	23
2.4.2.1. Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque	23
2.4.2.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque	24
2. 4.3. Paramètres des cellules photovoltaïques	26
2.4.4. Caractéristique courant-tension $I=f(V)$	27
2.4.4.1. Les paramètres qui influent sur la caractéristique courant-tension $I(V)$	29
2.4.4.1.1. L'influence de la température	29
2.4.4.1.2. L'influence de l'éclairement	29
2.4.5. Type des cellules photovoltaïques	30
2.4.5.1. Cellule cristalline	30
2.4.5.2. Cellules amorphes	31
2.4.6. Modules (ou panneaux) photovoltaïques	31
2.4.6.1. Association des modules solaires	32
a)Association série	32
b) Association parallèle	33
c)Association Mixte (Série+Parallèle)	33
2.5. Les systemes photovoltaïques	33
2.5.1. Définition d'un systèmephotovoltaïque	33
2.5.2. Les différentes Structures des systèmes photovoltaïques	33
2.5.2.1. Le système à bus continu intermédiaire	33
2.5.2.1.1. Structure avec convertisseur forward	34
2.5.2.1.2. Structure avec convertisseur de type fly-back	35
2.5.2.1.3. Structure avec hacheur et onduleur	35
2.5.2.2. Les systèmes à connexion directe au réseau	36
2.5.2.2.1. Structure à convertisseur unique	36

2.5.2.2.2. Structure avec bus à basse tension alternative	37
2.5.3. Topologies des systèmes photovoltaïques	38
2.5.3.1. Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)	38
2.5.3.2. Topologie avec onduleur de rangée (string inverter)	39
2.5.3.3. Topologie avec onduleur multiple-string	39
2.5.3.3. Topologie avec onduleur modulaire (module-integrated inverter)	39
2.6. Principaux impacts générés par les installations photovoltaïques sur les reseaux BT	40
2.6.1. élévation locale du niveau de tension	40
2.6. 2.Courant d'appel	41
2.6. 3.Flux de puissance inverse	42
2.6. 4. Sécurité	42
2.6.5. Fluctuation de la puissance de sortie	42
2.6. 6.Déséquilibre de phase	43
2.6. 7. Harmonique	43
2.6.8. Fluctuation de fréquence	43
2.6. 9.Problème d'interférence électromagnétique	43
2.7.Systèmes photovoltaïques : avantages et limites	43
2.8.Conclusion	44

Chapitre 03 : Système de production d'électricité éolienne

3.1. Introduction :	53
3.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	53
3.3. Définition de l'énergie éolienne	54
3.4. Principales composantes d'éolienne	54
3.4.1. Principe de fonctionnement	54
3.4.2. Constitution d'une éolienne	55
3.5. Classement des éoliennes selon l'orientation de leur axe de rotation	56
3.5.1. Éolienne a axe vertical	56
3.5.2. Éoliennes à axe horizontal	57
3.6. Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation	59
3.7. Notions theoriques Sur l'aerogenerateur	60
3.7.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	60
3.7.2. Limite de Betz	61

3.7.3. Coefficient de puissance C_p	62
3.7.4. Couple produit par l'éolienne	63
3.7.5. Vitesse spécifique de l'éolienne	63
3.7.6. Courbes caractéristiques des turbines éoliennes	63
3.8. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	64
3.9. Systemes de régulation de vitesse d'une éolienne	65
3.9.1. Système à décrochage aérodynamique " Pitch "	65
3.9.2. Système à décrochage aérodynamique "Stall"	66
3.10. Etat de l'art sur les generateurs et les convertisseurs utilisées dans les systemes éolien	67
3.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	67
3.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil	67
3.10.1.2. Machine asynchrone à double stator	68
3.10.1.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	69
3.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	71
3.10.2. 1.Machine synchrone à rotor bobiné	72
3.10.2.2. Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)	73
3.10.3. Comparaison entre les différentes machines :	77
3.11. Impact de l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique BT	78
3.11.1. Fluctuation de tension	78
3.11.2. Variation de la fréquence	79
3.11.3. Harmoniques et inter-harmoniques	79
3.12. Modélisation et simulation du système de conversion d'énergie éolienne a base d'une MADA connectée au reseau BT	79
3.12.1 Description du système	80
3.12.2. Modèle du vent	80
3.12.3. Modélisation de la turbine	81
3.12.4. Modèle du multiplicateur	81
3.12.5. Modèle de l'arbre	82
3.12.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	82
3.12.3.1. Hypothèses simplificatrices	83
3.12.6.1. Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA	83
3.12.7. Modèle de la mada dans le plan (d,q)	85
3.13.7.1.La transformation de park	85
3.12.7.2.Application de la transformation de park	85

3.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	87
3.14. Conclusion	88

Chapitre 04 : Techniques d'optimisations des systèmes hybrides PV-éolien

4. 1.Introduction	101
4.2. Définition	101
4.3. Différentes types des systèmes hybrides	102
4.3.1. Selon le régime du fonctionnement	102
4.3.1. 1.Système d'énergie hybride autonome	102
4.3.1. 2.Système d'énergie hybride connectés au réseau	102
4.3.2. Selon la gamme de la puissance	103
4.4. Configuration du bus dans les systèmes hybrides	103
4.4.1. Architecture à bus continu	103
4.4.2. Architecture à bus alternatif	104
4.5. Différentes configurations des systèmes hybrides photovoltaïque/eolienne	105
4.5.1. Système hybride photovoltaïque/éolienne connecté au réseau	105
4.5.2. Système hybrides autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage	105
4.6. Commande et stratégie de fonctionnement d'un système hybride	106
4.6.1. Commandes mppt des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque	106
4.6.1. 1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	107
4.6.1. 2. Méthode de la conductance incrémentielle	109
4.6.1. 3. Méthode de la dérivée de la puissance	110
4.6.2. Commandes MPPT des systèmes de conversion d'énergie éolienne	116
4.6.2. 1. Contrôle de la vitesse spécifique (TSR)	117
4.6.2. 2. Algorithme basé sur la relation optimale (ORB)	118
4.6.2. 3. Algorithme hill climb	118
4.6.2. 4. MPPT hybride	118
4.6.2. 5. MPPT intelligentes	119
4.7. Avantages et inconvénients d'un système hybride	120
4.8. Conclusion	121

Chapitre 05 : Étude de l'impact de l'intégration d'un générateur hybride PV-éolien sur réseau BT

5.1. Introduction	131
5.2. Problème des harmoniques	131
5.3. La distorsion totale	132
5.4 . Réseaux d'étude	132
5.5. Présentation générale de la méthodologie	133
5.6. Illustration de la méthodologie concernant la qualification des paramètres du réseau pour le plan de tension	134
5.6.1. Choix de l'impact	134
5.6.2.Présentation d'outil informatique	134
5.6.3. Outil d'analyse	134
5.6.3.1. Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans GER	134
5.6.3.2. Chute de tension aux bornes d'une impédance RL avec GER	135
5.6.4. Indice de qualification	137
5.7. Les approches de solution et suggestions	138
5..8. Résultats de simulation	138
5.8. 1. Simulation du réseau BT non compensé	138
5.8.2. Simulation des chutes de tensions après l'insertion d'un générateur hybride PV/éolienn	141
5.8.2.1. Compensation locale	141
5.8.2.2. Compensation globale au début des lignes	142
5.8.2.3. Compensation globale au milieu de la distance de ligne	144
5.8.3. Comparaison entre les trois techniques de compensation	146
5.9. Conclusion	147
Conclusion générale	158
Références bibliographiques	

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01 : État de l'art sur les réseaux d'énergie électrique et l'intégration de la production décentralisée à base des énergies renouvelables

Figure (1.1) : Organisation physique générale des réseaux électriques	4
Figure (1.2) : Architecture générale du réseau électrique en Algérie.....	6
Figure (1.3) : Schéma de raccordement de modules photovoltaïques avec un hacheur supplémentaire	8
Figure (1.4) : Correspondance taille-puissance des éoliennes	9

Chapitre 02 : Système de production d'électricité photovoltaïque

Figure (2.1) : Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	22
Figure (2.2) : Structure d'une cellule solaire en silicium	23
Figure (2.3) : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure (2.4) : La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure (2.5) : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure (2.6) : Caractéristiques I(V) d'un module PV	28
Figure (2.7) : Caractéristique P(V) d'un module solaire.....	30
Figure (2.8) : Influence de la température sur la caractéristique I(V).....	30
Figure (2.9) : Influence de la l'éclairement sur la caractéristique I(V).....	30
Figure (2.10-a) : Cellule PV monocristalline	30
Figure (2.10-b) : Cellule PV poly cristalline	30
Figure (2.11) : Cellule photovoltaïque amorphe	31
Figure (2.12) : Association série	32
Figure (2.13) : Association parallèle	33
Figure (2.14) : Association mixte (Série+parallèle).....	33
Figure (2-15) : Installation photovoltaïque autonome.....	34
Figure (2.16) : Convertisseur de type forward alimentant le bus continu	34
Figure (2.17) : Structure avec convertisseur de type Fly-back.....	35
Figure (2.18) : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé	36
Figure (2.19) : Installation photovoltaïque couplée au réseau	36
Figure (2.20) : Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur.....	37

Figure (2.21): Bus à basse tension alternative.....	37
Figure (2.22): La topologie « Onduleur Central ».....	38
Figure (2.23): La topologie « Onduleur de rangée »	39
Figure (2.24): Hacheur (Multiple-string DC-DC) et l'onduleur	39
Figure (2.25): Onduleur modulaire (Module-integrated inverter).....	40
Figure (2.26): Variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV	41

Chapitre 03 : Système de production d'électricité éolienne

Figure (3.1): Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	55
Figure (3.2): Architecture d'une éolienne	55
Figure (3.3): Technologie éolienne à axe vertical	57
Figure(3.4): Technologie éolienne à axe horizontale.....	58
Figure (3.5): Colonne d'air animée d'une vitesse V	60
Figure (3. 6): Théorie de Betz : schéma de principe	61
Figure (3.7): Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée	63
Figure (3. 8): Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ	64
Figure (3.9): Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent... 65	
Figure (3.10): Variation de l'angle de calage d'une pale	66
Figure (3.11): Flux d'air sur un profil de pale " Stall "	66
Figure (3.12): Générateur asynchrone à cage d'écureuil.....	68
Figure (3-13): Schéma de l'éolienne avec la MAS à double stator connectée au réseau	69
Figure (3.14): Schéma d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	69
Figure (3.15): Machine asynchrone brushless connectée au le réseau.....	70
Figure (3.16): MADA - structure Kramer	70
Figure (3.17): MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	71
Figure (3.18): Structure de Scherbius avec Cyclo-convertisseur	71
Figure (3.19): Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur	72
Figure (3.20): Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) ave redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commandé.....	73
Figure (3.21): Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable	74
Figure (3.22): Machine synchrone avec redresseur à diodes	75

Figure (3.23): Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur .	75
Figure (3.24): Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	76
Figure (3.25): Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	76
Figure (3.26): Schéma synoptique pour le modèle de la chaine étudiée et sa commande	80
Figure (3.27): Simulation de profil de vitesse du vent	81
Figure (3.28): Schéma de la turbine éolienne.....	81
Figure (3.29): Représentation de la MADA dans les deux repères. a) Représentation deMADA dans le repère (a,b,c) ; b) Représentation de la MADA dans (d,q)	83

Chapitre 04 : Techniques d'optimisations des systèmes hybrides PV-éolien

Figure (4.1): Schéma Général De Système Hybride Multi-Sources, Charges Et Stockage...	102
Figure (4.2): Configuration du système hybride a bus alternatif	104
Figure (4.3): Configuration du Système Hybride A Bus Alternatif	104
Figure (4.4): Configuration d'un système photovoltaïque/Eolien.....	105
Figure (4.5): Configuration hybride générale dédiée a un site isole couplage éolien- Photovoltaïque.....	106
Figure (4.6) : Système photovoltaïque avec contrôleur MPPT	107
Figure (4.7): Caractéristique P(V) d'un panneau Photovoltaïque.....	107
Figure (4.8): Organigramme de la Technique P&O.....	108
Figure (4.9): Implémentation de la technique P&O sous Psim.....	108
Figure (4.10): Organigramme de l'algorithme de conductance incrémentale.....	110
Figure (4.11): Implémentation de l'algorithme de conductance incrémentale sous Psim....	110
Figure (4.12) : Caractéristique du point de puissance maximale PPM.....	111
Figure (4.13) : Implémentation de la Méthode de la dérivée de la puissance sous Psim....	111
Figure (4.14) : Profil d'éclairement (S1)	112
Figure (4.15) : Le courant consommé par la batterie (Ib1) et le courant généré par le module PV (IPV1).....	112
Figure (4.16) : La tension de la batterie (Vb1) et la tension du module PV (V_{PV1}).....	112

Figure (4.17) : La puissance extraite (P_{b1}) et la puissance maximale théorique extraite (P_{max1}).....	112
Figure (4.18) : L'efficacité moyenne obtenue avec la technique P&O.....	113
Figure (4.19) : Profil d'éclairement (S_2).....	113
Figure (4.20): Le courant consommé par la batterie (I_{b2}) et le courant généré par le module PV (I_{PV2}).....	113
Figure (4.21): La tension de la batterie (V_{b2}) et la tension du module PV (V_{PV2}).....	114
Figure (4.22): Puissance extraite (P_{b2}) et théorique de la puissance extraite maximale (P_{max2}).....	114
Figure (4.23) : L'efficacité moyenne obtenue avec la technique IC.....	114
Figure (4.24) : Profil d'éclairement (S_3).....	115
Figure (4.25) : Le courant (I_{b3}) consommé par la batterie et le courant(I_{PV3}) généré par le module PV.....	115
Figure (4.26) : La tension de la batterie (V_{b3}) et la tension(V_{PV3}) générée par le module PV.....	115
Figure (4.27) : La puissance extraite (P_{b3}) et théorique de la puissance maximale extraite (P_{max3}).....	115
Figure (4.28): L'efficacité moyenne obtenue avec la technique DP.....	116

Chapitre 05 : Étude de l'impact de l'intégration d'un générateur hybride PV-éolien sur réseau BT

Figure (5.1): Réseau BT urbain étudié	133
Figure (5.2): Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans GER.....	135
Figure (5.3): Réseau pour l'indice de qualification.....	137
Figure (5.4): Réseau électrique BT avant la compensation.....	139
Figure (5.5): Puissance active, puissance réactive consommées par un bâtiment type.....	139

Figure (5.6): Allure de la tension chez un abonné de la ligne BT de la 1 ^{ère} branche (nœud 04)	140
Figure (5.7) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1 ^{ère} branche (nœud 04) avant l'insertion des systèmes hybride PV/éolien.....	140
Figure (5.8): Le réseau électrique BT après la compensation locale	141
Figure (5.9) : Allure de la tension chez un abonné de la ligne BT de la 1ere branche (bâtiment 04) après la compensation locale	
Figure (5.10) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1ere branche (nœud 04) après la compensation locale.....	142
Figure (5.11): Le réseau électrique BT après la compensation globale au début de la 1ere branche.....	143
Figure (5.12) : Allure de la tension chez un abonné (Bâtiment 04) après la compensation globale au début de la 1 ^{ère} branche.....	143
Figure (5.13) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1 ^{ère} branche (Bâtiment 04) après la compensation globale au début de la 1 ^{ère} branche.....	144
Figure (5.14): Le réseau électrique BT après la compensation globale au milieu de la distance de ligne.....	145
Figure (5.15) : Allure de la tension chez un abonné de la ligne BT de la 1 ^{ère} branche (nœud 04) après la compensation globale au milieu de la distance de ligne.....	145
Figure (5.16) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1 ^{ère} branche (nœud 04) après la compensation globale au milieu de la distance de ligne.....	146
Figure (5.17) : Profils des tensions chez un abonné (Bâtiment 04) avant et après la compensation.....	146
Figure (5.18) : Allures des courants transités chez un abonné (Bâtiment 04) avant et après la compensation.....	147

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 01 : État de l'art sur les réseaux d'énergie électrique et l'intégration de la production décentralisée à base des énergies renouvelables

Tableau (1.1):Niveaux de tension en algérie 5

Chapitre 03 : Système de production d'électricité éolienne

Tableau (3.1) :Comparaison des eoliennes à axe horizontal, et à axe vertical..... 59

Tableau (3.2):Comparaison des eoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable 60

Tableau (3.3) :Avantages et inconvénients de différentes éoliennes 77

Chapitre 04 : Techniques d'optimisations des systèmes hybrides PV-éolien

Tableau (4.1) : Classification des systèmes hybrides par gamme de puissance 103

Tableau (4-2) : Résultats de comparaison sous $800\text{w} / \text{m}^2$, $T = 25^\circ$ 116

Tableau (4.3):Comparaison entre différentes MPPT des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque..... 116

Tableau (4.4):Comparaison entre différentes MPPT des systèmes de conversion d'énergie éolienne..... 120

Chapitre 05 : Étude de l'impact de l'intégration d'un générateur hybride PV-éolien sur réseau BT

Tableau (5. 1) :Les caractéristiques générales du réseau BT urbain étudié 133

Liste des acronymes et des symboles

Liste des Acronymes et des Symboles

P_{GED} : La puissance maximale produite par la production décentralisée.

P_{LOAD} : La puissance maximale consommée par la charge.

$Disp_{GED}$: Le niveau de dispersion de la production décentralisée.

Bus_{GED} : Le nombre de nœuds dans lesquels une GED est connecté

GED : Génération d'énergie dispersée

PAC : Pile à combustible

BT : Basse tension

GER : Générateur a énergie renouvelable

A : facteur de qualité

I_{ph} : photo- courant.

I_d : courant traversant la diode.

q : charge de l'électron ($1.9 \cdot 10^{-19}$ coul).

k : la constante de Boltzmann.

U_T : tension thermique.

I_s : courant de saturation.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt

A : Facteur de qualité

I_{CC} : Courant de court-circuit

V_{CO} : Tension à circuit ouvert

P_{max} : Puissance maximale

ff : Facteur de forme

Liste des Acronymes et des Symboles

η_c : Rendement d'une cellule solaire

$P_{solaire}$: Puissance du rayonnement solaire incident

η_g : Rendement de générateur photovoltaïque

P_e : la puissance d'entrée du champ PV

E : Irradiation solaire sur le plan incliné du module photovoltaïque (W/m^2).

S : Surface du module photovoltaïque (m^2).

N_S : Nombre de module en série.

N_P : Nombre de module en parallèle.

P_S : la puissance à la sortie du champ photovoltaïque.

V : La tension aux bornes du champ photovoltaïque (V).

I : Le courant aux bornes du champ photovoltaïque (A).

η_{max} : Le rendement maximum de générateur photovoltaïque.

ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m^3) ;

v : Vitesse instantanée du vent (m/s)

E_c : Energie cinétique du vent (Joules).

P_{mt} : La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S

C_p : Coefficient de Puissance

Γ : Couple Produit par L'éolienne

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

λ : Vitesse Spécifique de L'éolienne

V_D : Vitesse de démarrage

V_n : vitesse nominale du vent relatif

V_M :Vitesse maximale du vent relatif

P_{mg} :La puissance transmise par la génératrice

C_{em} :Le couple électromagnétique

Ω_s :La vitesse de synchronisme

ω : La pulsation du réseau

p : le nombre de paires de pôles

C_T, C_g :Le couple éolien et le couple électromagnétique.

Liste des Acronymes et des Symboles

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide)

J_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

L_{ss}, L_{rr} : les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine ;

C_r : Le couple résistant ;

f_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;

Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;

J : L'inertie des parties tournantes.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$ et φ_{rq} sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système

$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}$: Pulsations électrique

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$: La pulsation et mécanique

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé

Introduction générale

Le prix d'extension du réseau électrique pour les régions isolées et éloignées s'avère prohibitif et excessif ainsi que le surcoût d'approvisionnement en carburant augmente radicalement avec l'isolement. Le recours au système d'énergie hybride fait signe aux systèmes de génération d'énergie électrique par combinaison de plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergies renouvelables comme le photovoltaïque, l'éolienne, la biomasse et des petites centrales hydrauliques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels destinés généralement pour alimentation électrique des régions isolées. Les systèmes d'énergie hybride sont habituellement élaborés pour répondre aux besoins énergétiques de l'électrification des maisons autonomes ou l'électrification complète de villages isolés ou de petites îles. Les énergies renouvelables sont économiquement fiables et rentables pour l'intégration dans les systèmes de production d'énergie électrique, cependant, des améliorations dans la conception et le fonctionnement des systèmes hybrides sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitives ces filières technologiques et permettre leur progression.

L'insertion des diverses sources d'énergies dans un système hybride doit avoir une conséquence profitable et bénéfique sur la production d'énergie, en terme de coût et de disponibilité, aussi bien que le bilan écologique est présumé favorable. Les moyens de production d'énergies renouvelables représentent des capacités de production variables, incertaines et souvent intermittentes et fluctuantes, non corrélées à la demande de charge. L'objectif d'un système hybride est d'assurer la demande de charge et d'optimiser sa production afin de combler l'énergie demandée par la charge durant la période d'intermittence et tout en maintenant la qualité d'énergie fournie.

Le système hybride de production d'énergie est un système qui combine et exploite différentes sources d'énergies disponibles et facilement mobilisables. Ce type de système associe au moins deux technologies complémentaires, une source classique, qui est généralement un générateur diesel et une source ou plus d'énergie renouvelable en vue d'obtenir et de maintenir une production énergétique continue et durable. Les systèmes hybrides sont souvent autonome vis à vis des grands réseaux interconnectés et fréquemment utilisés dans les régions isolées. Ces systèmes seront conçus dans l'intention d'économiser le carburant et la baisse de prix obtenue par la génération hybride doit au moins couvrir l'investissement envisagé d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système.

L'importance de combiner différentes sources d'énergie dans un système hybride d'énergie renouvelable a gagné plus d'attrait. Ces systèmes hybrides peuvent surmonter les limites des technologies individuelles.

Les chutes de tension aux extrémités d'un réseau est une préoccupation primordiale du distributeur électrique. Dans un réseau urbain à basse tension, la qualité de la tension sera inacceptable si la chute de tension dépasse 5%.

Les stations hybrides PV-éolien raccordées au réseau peuvent contribuer à l'amélioration de la tension en bout de réseau où les chutes de tension atteignent des valeurs inacceptables par conséquent des effets négatives sur le distributeur et le client. Sachant que les principaux paramètres caractérisant le service électrique sont la qualité de la tension dont le distributeur est tenue contractuellement à la respecter autour des valeurs admissibles. Également, le distributeur doit aussi respecter la continuité de la fourniture d'électricité. L'amélioration de la tension au bout du réseau électrique est possible à l'aide de plusieurs techniques : le renforcement des sections des conducteurs, installation de nouveaux poste MT/BT, etc. Les minis centrales PV-éolien raccordées au réseau électrique BT, est l'une des solutions utilisées pour résoudre ce problème en produisant l'énergie électrique à l'endroit du déficit. Dans ce travail, nous voulons étudier la rentabilité de l'intégration de la production hybride PV-éolien dans un réseau de distribution du point de vue technique de remédier aux insuffisances de la charge et le redressement de la tension en bout de réseau. En effet, une mini centrale hybride PV-éolien placée en bout de ligne permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance surtout quand la pointe de la demande est en phase avec l'intensité de l'ensoleillement. Pour cela nous avons réalisé une étude de cas réel sur un réseau BT urbain, siège de contraintes d'exploitation. Ce réseau étudié est situé au nord Algérien dans la région de daïra de Heddada, wilaya de Souk Ahras.

Le travail présenté dans cette thèse est organisé en cinq chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre présente d'une manière brève des généralités sur les réseaux électriques (principes de fonctionnements, organisation physique, niveaux de tension) et, une description plus détaillée des réseaux de distribution. Les différents types de productions décentralisées à base d'énergie renouvelable sont ensuite passés en revue.

Dans le deuxième chapitre, après une étude historique sur l'évolution des cellules photovoltaïques, nous allons exposer de manière brève les différentes technologies de cellules

photovoltaïques ainsi que leur regroupement en modules, les différentes applications photovoltaïques, que ce soit pour des applications autonome ou raccordée au réseau public. Également, les principaux impacts générés par les installations photovoltaïques sur les réseaux BT seront présentés.

Le troisième chapitre présente une revue de synthèse sur les systèmes éoliens où nous avons donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éoliennes et leurs principales composantes, les différentes génératrices et convertisseurs utilisées, la description et l'impact sur le réseau et sur la qualité d'énergie dans les systèmes éoliens. La modélisation mathématique des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse constante est simulée dans l'environnement Psim.

Le quatrième chapitre présente de manière brève les différentes classifications des systèmes d'énergies hybrides ainsi que les différentes configurations des systèmes hybrides photovoltaïque/éolienne. Les techniques d'optimisation des systèmes hybride PV-éolien sont aussi présentées.

Le dernier chapitre présente les conséquences des chutes de tension, les différentes méthodes de compensation de tension telle que la compensation locale, la compensation globale au début des lignes et la compensation globale au milieu de la distance des lignes sont présentées.

Enfin, les principales conclusions de ce travail de recherche et les perspectives qui en résultent sont données dans la conclusion générale.

Chapitre 01 :
État de l'art sur les réseaux d'énergie électrique et
l'intégration de la production décentralisée à base des
énergies renouvelables

« Le serpent qui ne peut changer de peau, meurt. Il en va de même des esprits que l'on empêche de changer d'opinion : ils cessent d'être esprit. »

F. Nietzsche

Chapitre01 : État de l'art sur les réseaux d'énergie électrique et l'intégration de la production décentralisée à base des énergies renouvelables

1. 1. Introduction	3
1.2. Fonctionnement des systèmes électriques	3
1.2.1. Organisation physique	3
1.2.2. Niveaux de tension	5
1.3. Réseaux électriques de distribution	5
1.3.1. Réseaux de distribution à moyenne tension(mt)	5
1.3.2. Réseaux de distribution basse tension (BT)	5
1.3.3. Caractéristiques techniques générales	6
1.4. Intégration de génération d'énergie distribuée dans le réseau de distribution électrique	7
1.4.1. Génération d'énergie distribuée	7
1.4.1.1. Définition	7
1.4.1.2. Différents types de génération d'énergie distribuée à base d'énergie renouvelable	8
1.4.1.2.a. Production de l'énergie électrique d'origine solaire	8
1.4.1.2.b. Production de l'énergie électrique d'origine éolienne	9
1.4.1.2.c. Production de l'énergie électrique d'origine biomasse	9
1.4.1.2. d. Production de l'énergie électrique d'origine géothermique	10
1.4.1.2.e. Production de l'énergie électrique d'origine hydraulique	10
1.4.1.2.f. Production de l'énergie électrique d'origine marine	10
1.5. Utilisation de l'énergie renouvelable	11
1.5.1. Systèmes raccordés au réseau	11
1.5.2. Systèmes autonomes	11
1.6. Avantages des énergies renouvelables	12
1.7. Inconvénients des énergies renouvelables	12
1.8. Conclusion	13

1.1. Introduction

La production décentralisée se définit par opposition à la production classique centralisée qui est caractérisée par des unités de grandes puissances raccordées au réseau électrique haute tension. Les réseaux de distribution représentent le maillon du système de puissance où le développement de la production décentralisée (DG) est le plus attendu [1]. L'électricité représente dans le monde près de 20% de la consommation finale d'énergie [2]. Le système électrique est ainsi au centre du développement de nos sociétés modernes et son bon fonctionnement est donc primordial pour la continuité des activités économiques. Ces réseaux ont la particularité d'être des réseaux de grandes dimensions, interconnectés et conçus pour fonctionner avec de la génération centralisée de forte puissance. L'ouverture du marché de l'énergie électrique et les préoccupations environnementales grandissantes, liées au changement climatique planétaire amènent des changements importants sur ces réseaux électriques, en particulier sur les réseaux de distribution avec l'arrivée massive de productions décentralisées. Cette phase transitoire est plus ou moins accomplie suivant les pays mais globalement, les mêmes transformations et mécanismes se retrouvent d'un pays à un autre [3].

1.2. Fonctionnement des systèmes électriques

1.2.1. Organisation physique

Le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension: le réseau de transport et de répartition auxquels sont connectés les grands groupes de production centralisée, et le réseau de distribution alimentant la plupart des consommateurs. Cette structure verticale (transport, répartition, distribution) est schématisée par la figure (1.1) [4].

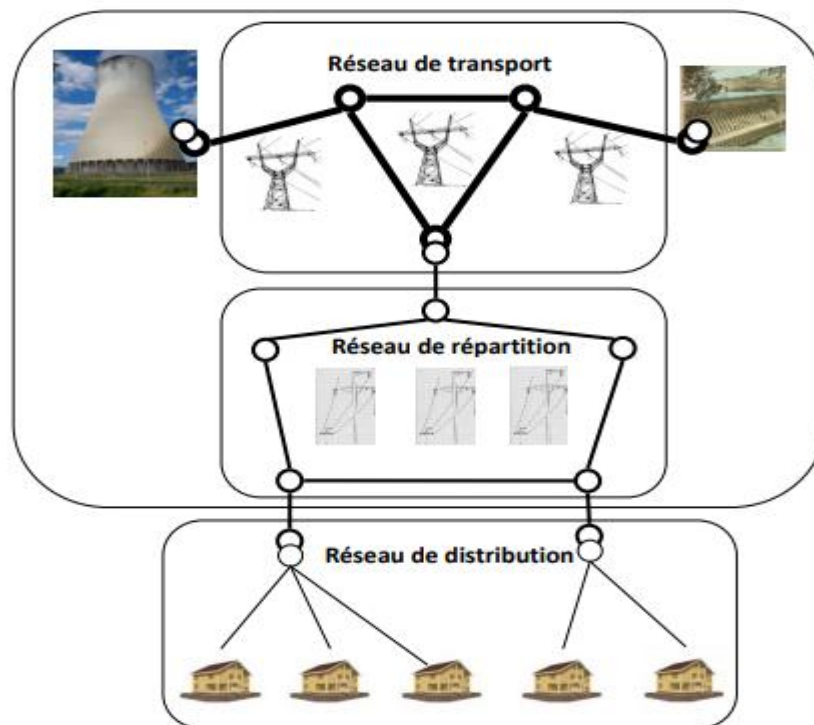


Figure (1.1): Organisation physique générale des réseaux électriques [5]

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe. L'ordre de grandeur de la puissance active produite par ces groupes est compris entre 100MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires. Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser les pertes effet de joule sur les lignes, ces réseaux sont à très haute tension (de 63 kV à 400 kV). Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés. Les flux de puissance sont bidirectionnels. D'une manière générale, les réseaux de transport, comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc. Les réseaux de distribution, assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA). Ils sont divisés en réseaux HTA (moyenne tension) et BTA (basse tension) domaine de notre étude. La limite entre ces deux niveaux de tension se trouve au niveau des postes de distribution publique HTA/BTA [4].

1.2.2. Niveaux de tension

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative dans le tableau (1.1).

Tableau (1-1):Niveaux de tension en Algérie

Domaine de tension		Valeur de la tension composée nominale	
		(Un en Volts)	
		<i>Tension Alternative</i>	<i>Tension Continue</i>
Très Basse Tension (TBT)		$Un \leq 50$	$Un \leq 120$
Basse tension (BT)	<i>BTB</i>	$50 < Un \leq 500$	$120 < Un \leq 750$
	<i>BTB</i>	$500 < Un \leq 1000$	$750 < Un \leq 1500$
Haute tension (HT)	<i>HTA ou MT</i>	$1000 < Un \leq 50000$	$1500 < Un \leq 75000$
	<i>HTB</i>	$Un > 50000$	$Un > 75000$

1.3. Réseaux électriques de distribution

Les réseaux de distribution représentent le dernier maillon de la chaîne d'acheminement de l'énergie entre les centres de production et les consommateurs finaux. Ils sont en général plus vastes et plus denses que les réseaux de transport et de répartition qui les alimentent à travers les postes de transformation haute tension de niveau B (supérieur à 50 kV) vers la haute tension de niveau A (comprise entre 1 et 50 kV) [4].

1.3.1. Réseaux de distribution à moyenne tension (MT)

Leur tension est comprise entre 2.4 kV et 69 kV dont les longueurs allant de 80km à 230km. Ce réseau relie les clients aux postes de transformation principaux [7].

1.3.2. Réseaux de distribution basse tension (BT)

Il est constitué des lignes aériennes dans les régions rurales, et des câbles souterrains dans les lieux urbains et les centres industriels. Leur tension est comprise entre 120V et 600V dont les longueurs sont inférieures à 80 km. Nous distinguons dans les réseaux de distribution deux entités principales que sont les postes et les liaisons [7]. La figure (1.2) montre l'architecture de réseau électrique en Algérie [6].

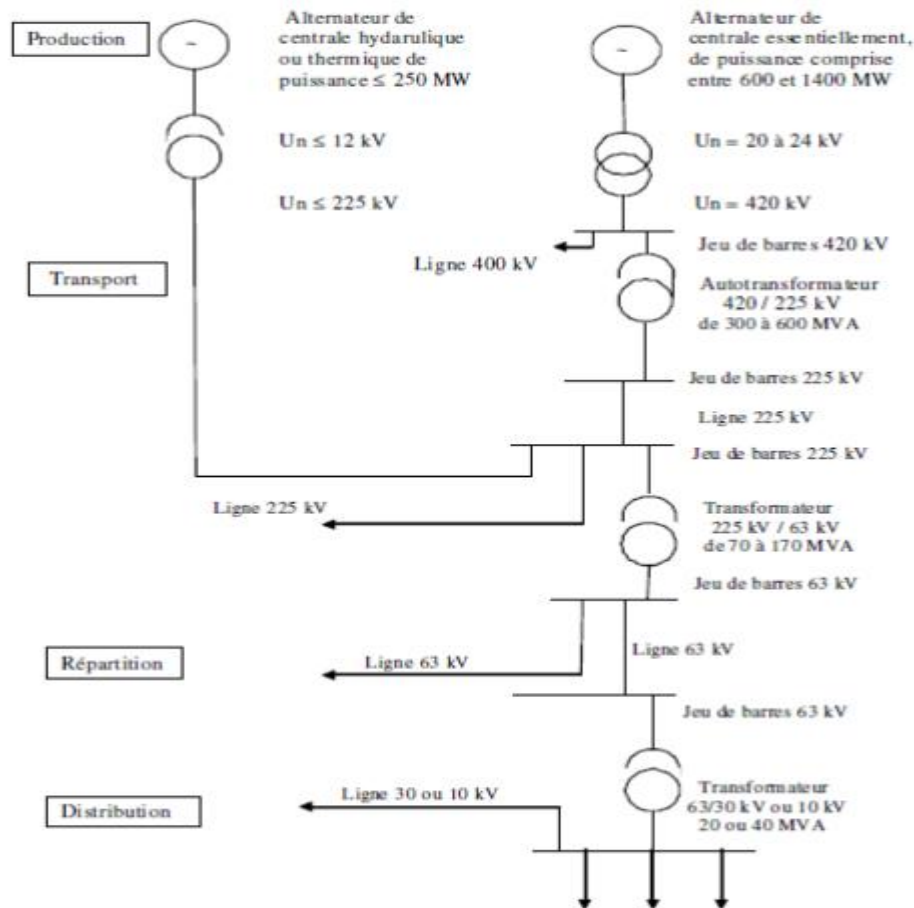


Figure (1.2) : Architecture générale du réseau électrique en Algérie [6]

1.3.3. Caractéristiques techniques générales

Les réseaux de distribution constituent l'infrastructure la plus importante du système électrique car c'est l'interface finale qui mène à la plupart des clients. Ils sont exploités dans des gammes de tensions inférieures à 50 kV, soit le domaine de la HTA et de la BT.

En Algérie, les tensions nominales des réseaux de distribution HTA sont de 10 kV et 30 kV. Ces niveaux de tension permettent un bon compromis pour limiter les chutes de tension, minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) et réduire les contraintes inhérentes aux hautes tensions (coûts des investissements, protection des biens et des personnes). Les réseaux de distribution sont, dans la très grande majorité des cas, exploités de manière radiale. Cette structure simplifie notamment le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source (HTB/HTA) vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux pour la détection et l'élimination rapide des défauts et permet facilement d'assurer la maintenance du réseau, ainsi que le comptage de l'énergie aux

postes sources. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont bien entendu prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances [8].

1.4. Intégration de la génération d'énergie distribuée dans le réseau de distribution électrique

Traditionnellement, le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production centralisée au réseau de distribution, Au cours de ces dernières années, la tendance de libération du marché de l'électricité a favorisé l'apparition de nombreux producteurs dans les réseaux électriques [9]. On appelle ces nouveaux producteurs par plusieurs noms comme production décentralisée, production distribuée, génération d'énergie distribuée ou génération d'énergie dispersée(GED), (en anglais sous le nom distributed,dispersed,decentralized or Embedded generation,(DG,EG)[9].

1.4.1. Génération d'énergie distribuée (GED)

1.4.1.1. Définition

Les GED sont des sources de productions intermittentes (éolien, photovoltaïque...) ou non (centrale thermique, groupe diesel...) qui sont connectées au réseau de distribution. Leur puissance installée doit être inférieure à 12 MW au point de livraison lorsque l'installation est raccordée dans une zone qui n'est pas interconnectée avec le réseau métropolitain et inférieure à 17 MW. Les parcs de production, éoliens par exemple, de plus grande puissance sont généralement connectés directement au réseau de transport ou tronçonnés en lots plus petits [10]. Dans les années à venir, les préoccupations grandissantes vis-à-vis de la protection de l'environnement, de l'augmentation de l'indépendance énergétique et du développement durable visent à augmenter l'insertion de productions décentralisées principalement à base de sources d'énergies renouvelables. Ces productions devront être connectées au réseau de distribution qui a été conçu, à la base, pour faire transiter des flux de puissance unidirectionnels. Malheureusement, suivant les conditions de charge et de production, l'apparition de ces productions peut engendrer des flux bidirectionnels [11].La production décentralisée peut être classifié sur la base de la puissance nominale. Ainsi la capacité d'une micro GED varie de 1 kW à 5 kW, une petite GED de 5 kW à 5 MW, une moyenne GED de 5 MW à 50 MW, strictement raccordé au réseau de distribution et la production centralisée de 50 MW à 300 MW. Il existe aussi deux facteurs qui permettent de quantifier la présence de GED dans le réseau [12]:

Le niveau de pénétration de la production décentralisée (τ_{GED}) qui est la fraction de la charge totale du système servi par la (ou les) GED, est défini par l'équation suivante :

$$\tau_{GED}(\%) = \frac{P_{GED}}{P_{LOAD}} \times 100\% \quad (1 - 1)$$

Où P_{GED} est la puissance maximale produite par la production décentralisée et P_{LOAD} la puissance maximale consommée par la charge.

Le niveau de dispersion de la production décentralisée ($Disp_{GED}$) reflète le nombre d'emplacements dans le réseau, où la production décentralisée est installée. Ce niveau est défini par l'équation suivante :

$$Disp_{GED}(\%) = \frac{\#Bus_{GED}}{\#Bus_{LOAD}} \times 100\% \quad (1 - 2)$$

où $\# Bus_{GED}$ est le nombre de nœuds dans lesquels une GED est connecté et $\#Bus_{Load}$ le nombre total de nœuds de charge.

1.4.1.2. Différents types de production décentralisée à base d'énergie renouvelable

1.4.1.2. a. Production de l'énergie électrique d'origine solaire

Les générateurs photovoltaïques délivrent une onde continue. Ainsi, afin de les raccorder à des réseaux ou à des charges fonctionnant en alternatif, nous utilisons différentes configurations [13]:

La configuration la plus classique consiste à insérer, entre l'unité de production et le réseau, un onduleur CC/CA. Pour certaines applications, une autre configuration consiste à rajouter, au niveau du bus continu, un étage supplémentaire de type hacheur (convertisseur CC/CC). Celui-ci remplace alors la commande de la tension (figure 1.3).

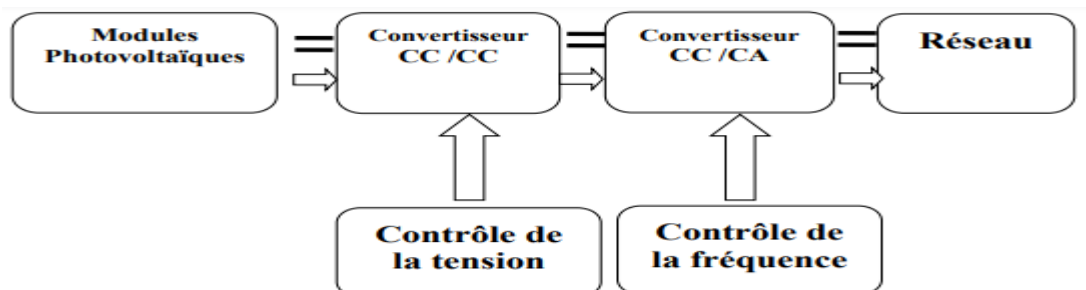


Figure (1.3): Schéma de raccordement de modules photovoltaïques avec un hacheur supplémentaire [14]

Les onduleurs utilisés sont en général de type triphasé à IGBT commandés en Modulation de Largeur d'Impulsions (PWM). Un module photovoltaïque se comporte de façon quasi identique à une source de courant dont l'intensité est directement liée à l'intensité de la source lumineuse. La régulation de la tension permet donc de réguler la puissance [15].

1.4.1.2. b. Production de l'énergie électrique d'origine éolienne

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [16]:

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

La figure (1.4) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

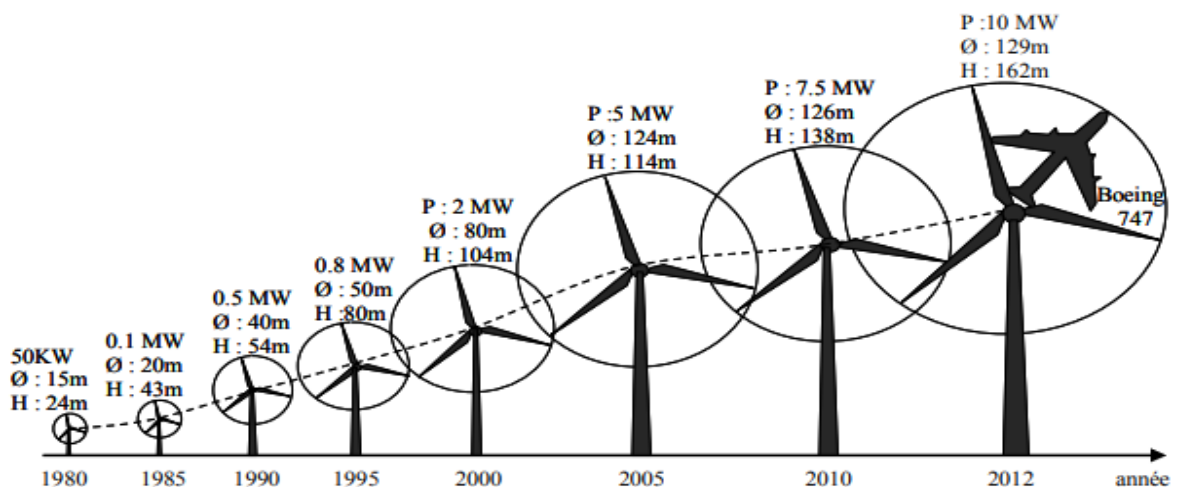


Figure (1.4): Correspondance taille-puissance des éoliennes[16]

1.4.1.2. c. Production de l'énergie électrique d'origine biomasse

La biomasse est l'énergie obtenue à partir des végétaux. Elle se place au 4ème rang des énergies primaires (derrière le pétrole, le charbon et le gaz naturel) mais cette source d'énergie est très souvent utilisée avec des rendements énergétiques médiocres ; il s'agit de l'énergie du pauvre (bois, déchets agricoles, etc.) qui est utilisée à l'intérieur du foyer et conduit donc à une pollution locale nuisible pour la santé des populations. Dans les pays en voie de développement les plus pauvres (pays Africains), la biomasse représente plus de 95 %

des approvisionnements énergétiques et elle est utilisée la plupart du temps sous des formes traditionnelles et peu efficaces. Dans les deux pays les plus peuplés de la planète, la Chine et l'Inde, elle compte respectivement pour 30 % et 45 % de la consommation énergétique intérieure. Il est toutefois possible d'utiliser cette biomasse avec des rendements plus élevés (de 40 à 60 %) en l'utilisant comme source d'énergie pour la cogénération [17].

1.4.1.2. d. Production de l'énergie électrique d'origine géothermique

La géothermie est la troisième source d'énergie renouvelable dans le monde avec 8340 MW électrique et 9963 MW thermique. Elle correspond principalement à l'utilisation des gisements naturels de vapeur (geysers) ou d'eau chaude, situés à proximité de volcans. L'eau dans ces sous-sols est en contact avec des roches très chaudes sous une pression importante due à la profondeur, ce qui entraîne des températures très élevées, jusqu'à 350°C. L'eau récupérée peut être utilisée directement pour chauffer des logements, des serres, de l'eau de pisciculture, ou pour produire de l'électricité dans une centrale thermique. L'utilisation de la géothermie semble toutefois limitée (du fait de l'emplacement des sites) pour une utilisation généralisée dans les pays en développement [17].

1.4.1.2. e. Production de l'énergie électrique d'origine hydraulique

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau en énergie électrique. La puissance produite dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau. Il existe donc des centrales dites au fil de l'eau de faible hauteur de chute mais avec un débit d'eau important et des centrales dites de haute et moyenne chute pour lesquelles le débit d'eau est plus faible mais la hauteur de chute plus importante. Cette classification concerne plutôt les productions de forte puissance. Pour la production décentralisée, on emploiera préférentiellement le terme de microcentrales. L'ordre de grandeur de la puissance des microcentrales hydrauliques est de 5MW. Outre le faible bilan carbone de l'installation, les avantages de l'énergie hydraulique sont la gratuité de l'énergie primaire et la régularité de la production électrique. Les inconvénients principaux sont le prix élevé de l'investissement initial et l'impact sur l'environnement [3].

1.4.1.2.f. Production de l'énergie électrique d'origine marine

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans

transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique [18].

Une autre façon de récupérer de l'énergie marine est la production grâce à la marée (usine marémotrice de la Rance par exemple) due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installés dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source d'une énergie substantielle [19].

1.5. Utilisation de l'énergie renouvelable

Depuis quelques années, il n'est plus nécessaire d'installer les systèmes de production d'énergie renouvelable précisément sur le lieu d'utilisation de l'énergie. Ils sont maintenant utilisés pour générer de l'énergie électrique qui est transférée par un réseau électrique sur une distance plus ou moins grande vers les utilisateurs. Pourtant, les systèmes d'énergie renouvelable individuels qui fournissent de l'électricité à de petites communautés sont assez répandus. Ils sont adaptés aux endroits dont la connexion au réseau n'est pas rentable, ou même impossible. On présentera le principe de ces deux applications principales de l'énergie renouvelable, notamment pour des éoliennes et des panneaux photovoltaïques [20].

1.5.1. Systèmes d'énergies renouvelables raccordés au réseau

Dans le domaine éolien, l'installation d'une ou quelques turbines éoliennes par des clients privés ou industriels est le premier champ d'application. L'installation distribuée de turbines éoliennes est faite presque exclusivement en connexion avec le réseau global. La consommation du client est enregistrée par un compteur et la puissance produite par l'éolienne est injectée au réseau public et comptabilisée à travers un autre compteur. La facturation est faite séparément, selon la consommation et la production d'énergie [21].

Pour l'énergie photovoltaïque, son utilisation est très répandue dans les bâtiments. La plupart des bâtiments sont raccordés au réseau électrique, l'électricité est disponible en permanence à un niveau de puissance choisi par le consommateur. L'installation d'un système d'énergie renouvelable peut améliorer le bilan énergétique du propriétaire. Le bilan sert souvent à réduire la consommation afin de faire des économies d'énergie du bâtiment. Celui-ci devient actif et produit de l'énergie [22].

1.5.2. Systèmes autonomes

Durant les dernières années, d'importants efforts ont été effectués pour l'utilisation de l'énergie renouvelable dans des systèmes de puissance locaux et régionaux à travers

l'intégration de systèmes de distribution de petite et moyenne taille. De nombreux travaux sur le développement des systèmes éoliens autant que photovoltaïques pour les sites isolés ont été réalisés [23].

De ce fait, les applications autonomes sont classées en deux familles [20] :

- Applications professionnelles : relais de télécommunication, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement...
- Applications pour des sites isolés : habitat loin du réseau, refuges...

1.6. Avantage des énergies renouvelables [24]

- Les énergies renouvelables sont disponibles naturellement ;
- Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre ;
- Les conséquences des accidents, dus à ces énergies, ne sont pas importantes et ils sont faciles à résoudre par rapport aux énergies conventionnelles (centrale nucléaire ou pétrolière) ;
- Le coût d'une énergie renouvelable est principalement fixé par l'investissement industriel ;
- La destruction des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux.

1.7. Inconvénients des énergies renouvelables

- L'intermittence des sources des énergies renouvelables (à l'exception de l'énergie géothermique) ;
- Les énergies renouvelables demandent de l'espace et ont un impact sur les usages des territoires ;
- Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre, et inversement l'énergie issue de la combustion de la biomasse est propre à condition que la production ne soit pas excessive et permette à la flore de réabsorber tout le dioxyde de carbone dégagée);
- La construction des installations influence l'aspect visuel du paysage ;
- Les sources renouvelables offrent une variation indépendamment de la demande, comme les énergies solaire et éolienne qui exigent l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie.

1.8. Conclusion

Nous avons exposé dans ce premier chapitre d'une manière brève des généralités sur les réseaux électriques (principes de fonctionnements, organisation physique, niveaux de tension) et une description plus détaillée des réseaux de distribution est donnée en deuxième partie. Les différents types de productions décentralisées à base d'énergie renouvelable sont ensuite passés en revue. L'objet principal d'un réseau de distribution est bien d'assurer une fourniture idéale de puissance pour les clients. Les demandes des clients en matière de consommation qui augmente d'une manière incessante, à une influence importante sur les réseaux de distribution du fournisseur qui engendre une instabilité et surcharge sur ces réseaux. La satisfaction des dites demandes reste un défi majeur pour le fournisseur. Dans le même contexte et dans le but de compenser cette insuffisance, des nouvelles sources d'énergie électrique décentralisée sont implantés dans les réseaux de distribution. Ces sources et leurs impacts sur le réseau de distribution sont l'objet des chapitres suivants.

Références bibliographiques

- [1] V.T Khanh, «Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique», Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2009.
- [2] CeaMemento Sur L'énergie 2009, Commissariatàl'énergie atomique, Energy Hanbook. 2009.http://Www.Cea.Fr/Content/Download/23534/379632/_Le/Cea_Memento_Sur_L-Energie_2009.pdf.
- [3] Berseneff, Boris, « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur.», Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Grenoble(G2elab), Décembre2010.
- [4] Aissaoui Ahmed, « Planification des réseaux électriques de distribution pour une présence massive de la génération d'énergie dispersée », Thèse de Doctorat en Sciences, UniversitéDjilaliLiabes, Sidi-Bel-Abbès, 2016.
- [5] Egor Gladkikh, « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution d'énergie électrique », Thèse de Doctorat en Génie Electrique. Université Grenoble Alpes, 2015.
- [6] K. Nadhir, «Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée», Thèse de Doctorat, Université de Batna, Année2014.
- [7] J.C. Sabonnadière, N.Hadjsaid, «Ligne et Réseau Electrique Vol 1 », 1ère Edition Lavoisier. Année 2007.
- [8] Labed Djamel, « Production décentralisée et couplage au réseau », Thèse de Doctorat, Université frères Mentouri Constantine, Année 2008.
- [9] T, Thupham, « Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [10] P. Abadie, « Journal officiel de la république française, arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique », 25 Avril 2008.
- [11] J.-F. Canard, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble ,12 Décembre 2000.

- [12] Wendy Carolina Briceno Vicente, « Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes », Thèse de Doctorat G2ELab – Laboratoire de génie électrique, Université de Grenoble, 2012.
- [13] S. Martino, « Characteristics of the production », Électricité de France (Edf), June 2001.
- [14] Dung, Tran Khanh Viet, « Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au Réseau », Thèse de Doctorat, Québec: Université du Québec- Trois-Rivières, 2009.
- [15] P. Sanchis, J. Lopez, A. Ursua and L. Marroyo, « Electronic control device for the analysis and design of photovoltaic systems », IEEE Power Electronics Letters, Vol 3, Pp. 57-62, June 2005.
- [16] Wu, Bin, et al. Power conversion and control of wind energy systems. Vol. 76. John Wiley & Sons, 2011.
- [17] D. Thirault, « Architectures des réseaux de distribution pour l'électrification rurale des pays en développement », Thèse de Doctorat en Génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004.
- [18] Blunden, L. And Bahaj, A, « Energy resource assessment for tidal stream generators », Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part A: Journal of Power 2007.
- [19] O. Rourke, F. Boyle, F. And Reynolds. A, « Tidal Energy Update 2009 », Applied Energy, 87(2):398–409, and Energy, 221(2) :137–146.2010.
- [20] Minh Huynh Quang, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.2013.
- [21] Hau, E, « Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics », Springer Verlag. (2006).
- [22] Luque, A. And Hegedus, S, « Handbook of photovoltaic science and engineering », Wiley.2010.
- [23] Stiebler, M, « Wind energy systems for electric power generation », Springer Verlag. (2008).
- [24] SAIB Samia, « Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas — Setif1, Faculté de Technologie, 2018.

Chapitre 02 :
Système de production d'électricité
photovoltaïque



« Les livres peuvent éclairer la vie ; ils ne nous l'apprennent pas »

R. Quillot

2.1.Introduction	20
2.2. Historique	21
2.3.L'effet photovoltaïque	21
2.4. Le générateur photovoltaïque	22
2.4.1. La cellule photovoltaïque	22
2.4.2. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque	23
2.4.2.1. Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque	23
2.4.2.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque	24
2.4.3. Paramètres des cellules photovoltaïques	26
2.4.4. Caractéristique courant-tension $I=f(V)$	27
2.4.4.1. Les paramètres qui influent sur la caractéristique courant-tension $I(V)$	29
2.4.4.1.1. L'influence de la température	29
2.4.4.1.2. L'influence de l'éclairement	29
2.4.5. Type des cellules photovoltaïques	30
2.4.5.1. Cellule cristalline	30
2.4.5.2. Cellules amorphes	31
2.4.6. Modules (ou panneaux) photovoltaïques	31
2.4.6.1. Association des modules solaires	32
a) Association série	32
b) Association parallèle	33
c) Association Mixte (Série+Parallèle)	33
2.5. Les systèmes photovoltaïques	33
2.5.1. Définition d'un système photovoltaïque	33
2.5.2. Les différentes Structures des systèmes photovoltaïques	33
2.5.2.1. Le système à bus continu intermédiaire	33
2.5.2.1.1. Structure avec convertisseur forward	34
2.5.2.1.2. Structure avec convertisseur de type fly-back	35
2.5.2.1.3. Structure avec hacheur et onduleur	35
2.5.2.2. Les systèmes à connexion directe au réseau	36
2.5.2.2.1. Structure à convertisseur unique	36
2.5.2.2.2. Structure avec bus à basse tension alternative	37
2.5.3. Topologies des systèmes photovoltaïques	38
2.5.3.1. Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)	38
2.5.3.2. Topologie avec onduleur de rangée (string inverter)	39

2.5.3.3. Topologie avec onduleur multiple-string	39
2.5.3.3. Topologie avec onduleur modulaire (module-integrated inverter)	39
2.6. Principaux impacts générés par les installations photovoltaïques sur les réseaux BT	40
2.6.1. Elévation locale du niveau de tension	40
2.6. 2.Courant d'appel	41
2.6. 3.Flux de puissance inverse	42
2.6. 4. Sécurité	42
2.6.5. Fluctuation de la puissance de sortie	42
2.6. 6.Déséquilibre de phase	43
2.6. 7. Harmonique	43
2.6.8. Fluctuation de fréquence	43
2.6. 9.Problème d'interférence électromagnétique	43
2.7.Systemes photovoltaïques : avantages et limites	43
2.8.Conclusion	44

2.1.Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est particulièrement bien adaptée aux enjeux majeurs de notre société : diminution des gisements fossiles et nécessité de lutter contre le changement climatique. L'énergie solaire est inépuisable, disponible partout dans le monde et ne produit ni déchets, ni gaz polluants. C'est la raison pour laquelle le parc photovoltaïque se développe considérablement dans le monde depuis des dizaines d'années [25]. Un système photovoltaïque se compose de plusieurs outils nécessaires pour assurer une production d'électricité optimale. Une centrale solaire photovoltaïque est formée par un ensemble de panneaux solaires photovoltaïques, à base de silicium, reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. Ces derniers sont utilisés pour transformer la courante continue basse tension en courant alternatif haute tension, utilisable directement par les appareils classiques. La quantité d'énergie obtenue dépend toutefois de plusieurs facteurs, à savoir, la surface des modules utilisées ainsi que leur rendement et de l'ensoleillement qui varie selon la latitude, la saison et la météo par exemple [26]. Ainsi, on peut opérer la classification des configurations des systèmes photovoltaïques décentralisés pour l'alimentation en courant alternatif comme suit

A) Le photovoltaïque dans les réseaux d'alimentation.

- Photovoltaïque seul.
- Photovoltaïque avec accumulateurs électriques.

B) Le photovoltaïque dans des applications éloignées du réseau.

- Systèmes photovoltaïque-batterie.
- Systèmes hybrides photovoltaïques (avec présence d'autres sources).

Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables car relativement simple du point de vue technologique à mettre en œuvre : aucune pièce mécanique n'est en mouvement, les matériaux employés sont durables quel que soit les conditions climatiques, ce qui leur garantit une durée de vie relativement longue. Pourtant, le problème de couplage entre un panneau photovoltaïque et une charge n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale [20].

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de l'énergie photovoltaïque, les différentes technologies utilisées, les différentes structures de système photovoltaïque, les topologies de champs photovoltaïques et les principaux impacts générés par les systèmes photovoltaïques sur les réseaux BT.

2.2.Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [27].

- En 1839: le physicien français Edmond Becquerel a découvert le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- En 1875:le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- En 1883 : La première cellule solaire fonctionnelle a été construite par Charles Fritts, mais la performance de sa cellule, étant très basse, empêchait à l'époque son utilisation.
- En 1954: trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince ont mis au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- En 1958: les premiers satellites équipés de panneaux solaires sont envoyés dans l'espace. Parallèlement, une cellule offrant un rendement de 9% est développée
- En 1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware USA (à New York).
- En 1983: la première voiture alimentée par un panneau photovoltaïque parcourt une distance de 400 km en Australie.

2.3.L'effet Photovoltaïque:

Découvert par le physicien français A. Becquerel depuis 1839, l'effet de la technologie photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse du rayonnement solaire (photon) en électricité (Volt), grâce à la production et au transport de charges électriques positives et négatives sous un matériau semi-conducteur. Ce matériau comprend deux parties, l'une ayant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, appelés respectivement dopés de type n et dopés de type p. Lorsque le premier est mis en contact avec le second, les

électrons en excès dans le matériau(n) diffusent dans le matériau (p). La zone n initialement dopée devient chargée positivement et la région initialement dopée (p) est chargée négativement. Il se crée ainsi entre eux un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [26]. Donc, ce principe réside dans une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur transmettant de l'énergie ($h\nu$).

- ✓ Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur $E_g = E_v - E_c$, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement au passage des porteurs majoritaires.
- ✓ Si les photons ont une énergie très supérieure à l'énergie de gap, ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.
- ✓ Si les photons ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [28]. La figure suivante (figure 2.1) donne la représentation schématique d'une cellule photovoltaïque sous éclairement et son diagramme de bandes correspondant.

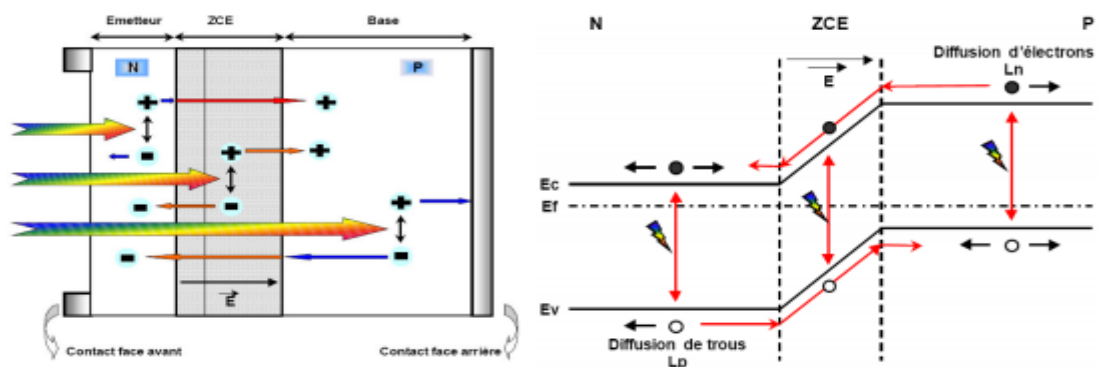


Figure (2.1) : Structure et diagramme de bandes d'énergie d'une cellule photovoltaïque sous éclairement [29]

2.4. Le générateur photovoltaïque

2.4.1. La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V à 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{co}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [30]. La figure (2.2) suivante illustre une cellule PV.

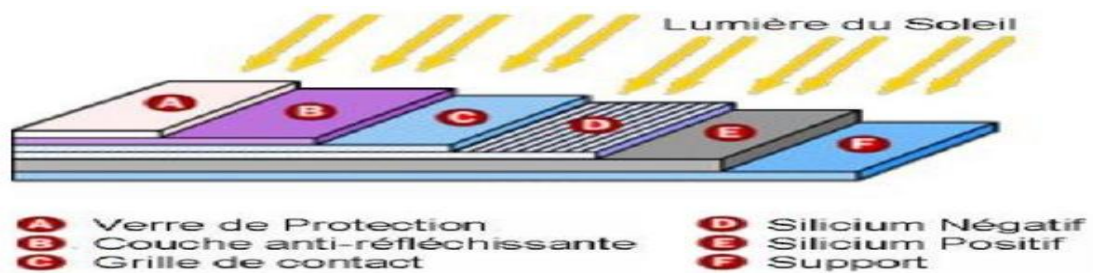


Figure (2.2) : Structure d'une cellule solaire en silicium

2.4.2. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque :

2.4.2.1. Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir du circuit équivalent donné par la figure (2.3) composé d'un générateur à courant et d'une diode en parallèle.

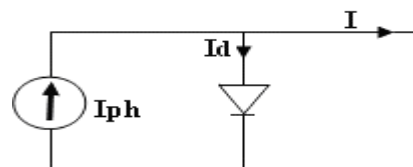


Figure (2.3) : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Donc le courant aux bornes de la cellule est : [31]

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2 - 1)$$

I_{ph} : Photon-courant

I_d : Courant traversant la diode

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (2 - 2)$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (2 - 3)$$

- ✓ q : charge de l'électron ($1.9 \cdot 10^{-19}$ coulomb)
- ✓ k : constante de Boltzmann
- ✓ U_T : tension thermique
- ✓ I_s : courant de saturation
- ✓ V : tension à la borne de la diode
- ✓ T : température absolue (en kelvin)

Si nous traçons le courant I en fonction de la tension V , nous devons procéder à une soustraction de deux courbes [32]:

$$I(V) = I_{ph} - I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (2 - 4)$$

- ✓ I_{ph} : le photo-courant.
- ✓ I_d : la caractéristique de la diode $I(V)$

La figure (2.4), représente les différentes courbes

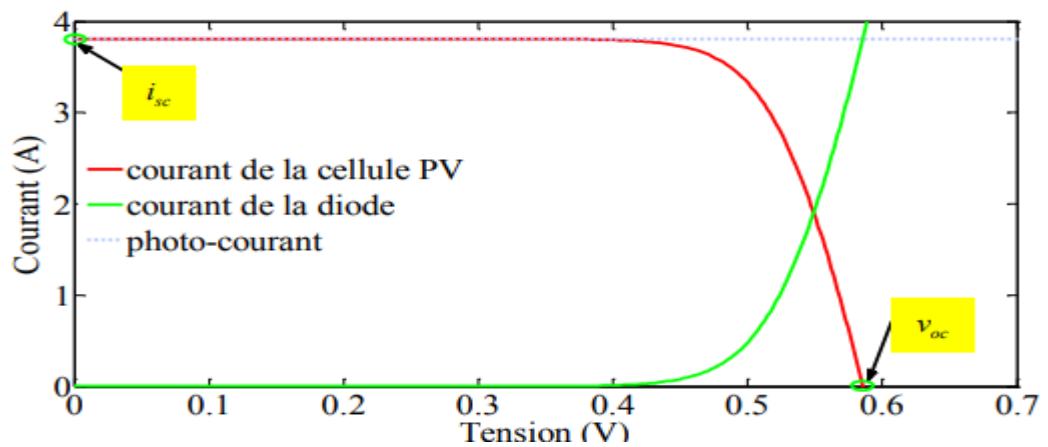


Figure (2.4) : La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [33]

2.4.2.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque :

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération. Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la figure (2.5) par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} . [34, 35].

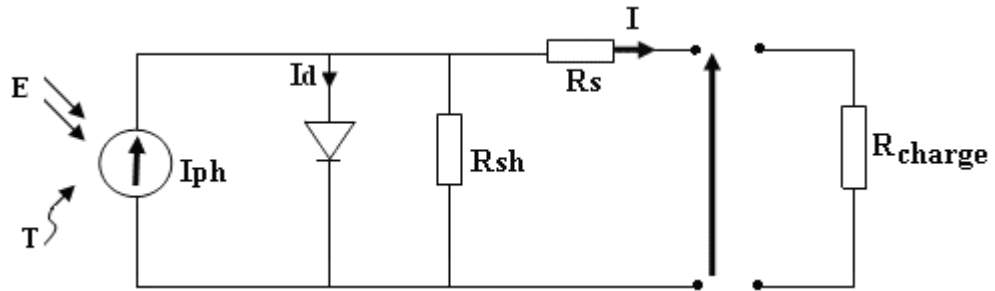


Figure (2.5) : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque [35]

- R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).
- R_{sh} est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques.
- La pente de la courbe courant-tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$) [34].
- Le photo-courant I_{ph} crée dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule). Le courant direct I_d d'obscurité de la jonction.
- Le courant I généré par la cellule et fourni à la charge.

Cet équilibre s'écrit [36] :

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la figure (2.6), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (2 - 5)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{AU_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (2 - 6)$$

- R_s : résistance série
- R_{sh} : résistance shunt
- A : Facteur de qualité.

2.4.3. Paramètres des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques I_{cc} , V_{co} , P_{max} , A , ff , $e\eta$, extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit I_{CC} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

Nous pouvons écrire :

$$I_{cc(V=0)} = I_{ph} \quad (2 - 7)$$

b) Tension à circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. Cela dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Il diminue avec la température et varie peu avec l'intensité de la lumière.

Nous pouvons écrire :

$$V_{co(I=0)} = AU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (2 - 8)$$

c) Puissance maximale :

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes [34].

Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit $(V.I)$; c.à.d.

$$P = V \left(I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{AU_T}\right) - 1 \right] \right) \quad (2 - 9)$$

Cette puissance fournie est maximale au point défini par :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial I}{\partial V} + 1 = 0 \quad (2 - 10)$$

Soit :

$$I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V}{AU_T} \right) - 1 \right) - VI_s \left(\frac{1}{AU_T} \right) \exp \left(\frac{V}{AU_T} \right) = 0 \quad (2 - 11)$$

La tension V_{max} et le courant I_{max} correspondant au maximum de puissance, sont alors données par :

$$\left(1 + \frac{V_{max}}{AU_T} \right) \exp \left(\frac{V_{max}}{AU_T} \right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (2 - 12)$$

Donc :

$$I_{max} = I_s \frac{V_{max}}{AU_T} \exp \left(\frac{V_{max}}{AU_T} \right) \quad (2 - 13)$$

Le produit ($V_{max} \times I_{max}$) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ($V_{co} \times I_{cc}$) [37].

d) Facteur de qualité :

Ce paramètre dépendant de la qualité de la diode, (compris entre 1 et 2).

e) Facteur de forme :

Le facteur de forme ff (fill- factor) est le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_{max} = I_{max} \times V_{max}$) de la photopile, et le produit $I_{cc} \times V_{co}$ sous les conditions de mesures standardisées où [38] :

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (2 - 14)$$

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

f) Rendement d'une cellule solaire

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [38] :

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (2 - 15)$$

2.4.4. Caractéristique courant-tension $I=f(V)$

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire se met sous la forme mathématique de l'équation (2-16) qui peut être reformulée sous la forme [39, 40, 41] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{AU_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2-16)$$

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1)[1 + K_0(T - T_1)] \quad (2-17)$$

$$I_{ph}(T_1) = I_{cc}(T_1 \cdot nom) \cdot \frac{E}{E_{nom}} \quad (2-18)$$

$$K_0 = \left(\frac{(I_{cc}(T_2) - I_{cc}(T_1))}{I_{cc}(T_1) \frac{1}{T - T_1}} \right) \quad (2-19)$$

$$I_s = I_s(T_1) \left(\frac{T}{T_1} \right)^{3/A} \exp \left(\frac{-V_g}{\frac{AU_T}{T} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)} \right) \quad (2-20)$$

$$I_s(T_1) = \frac{I_{cc}(T_1)}{\exp \left(\frac{V_{co}(T_1)}{AU_T \frac{T_1}{T}} \right) - 1} \quad (2-21)$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI_{V_{co}}} - \frac{1}{X_V} \quad (2-22)$$

$$X_V = I_s(T_1) \frac{1}{AU_T} \exp \left(\frac{V_{co}(T_1)}{AU_T \frac{T_1}{T}} \right) \quad (2-23)$$

Les équations (2-20) et (2-21) sont calculées en différenciant l'équation (2-16), l'évaluation à $V=V_{CO}$ et le réarrangement en terme R_s . [39, 40]. Les figures (2.6), (2.7) représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule pour un éclairement et une température donnée.

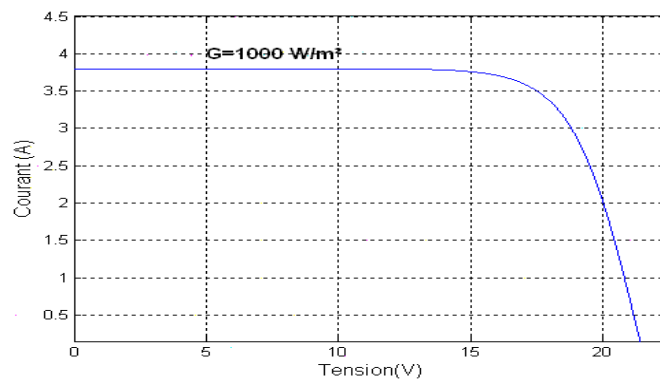


Figure (2.6) : Caractéristiques $I(V)$ d'un module PV.

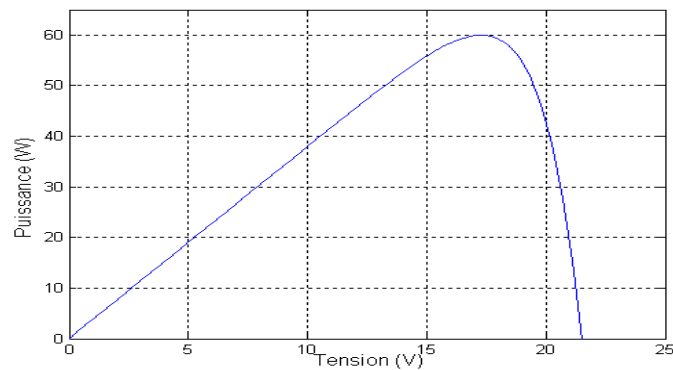


Figure (2.7) : Caractéristique $P (V)$ d'un module solaire

2. 4.4.1. Les paramètres qui influent sur la caractéristique courant-tension $I (V)$

2. 4.4.1.1. L'influence de la température

La température du module a une forte influence sur la tension de vide du module. Plus la température du module est élevée, plus la tension à vide V_{co} est basse. Par contre, la température du module a très peu d'influence sur le courant de court-circuit I_{cc} . Il y a ensuite une légère augmentation du courant I_{cc} accompagnée d'une forte diminution de la tension V_{co} et donc d'un décalage du point P_{max} vers les puissances inférieures. Ainsi, plus la température est élevée, moins la cellule est efficace. (Températures: 0c, 25c, 50c, 75c).

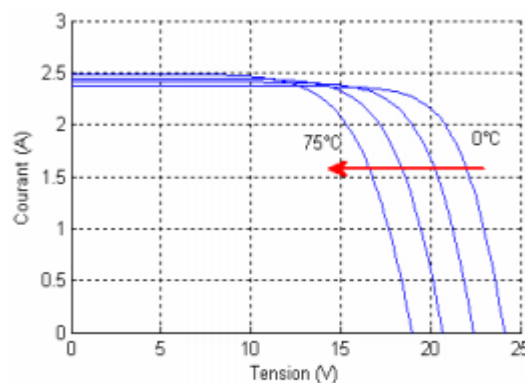


Figure (2.8) : Influence de la température sur la caractéristique $I (V)$

2. 4.4.1.2. L'influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairage qu'elle reçoit à sa surface. La figure (2.9) montre la caractéristique courant-tension d'un module solaire (PV) en fonction de l'éclairement, à une température ambiante et à une vitesse de l'air constant. Notez que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que

légèrement en fonction de l'éclairage, contrairement au courant I_{\max} qui augmente fortement avec l'éclairage.

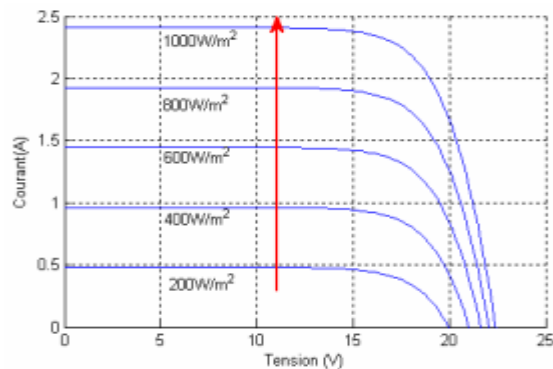


Figure (2.9) : Influence de la l'éclairement sur la caractéristique $I (V)$

2.4.5. Type des cellules photovoltaïques

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles :

2.4.5.1. Cellule cristalline

Cette technologie éprouvée et robuste avec une performance d'environ 13%. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Les modules de silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication sont en constante augmentation afin de viser le plus possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste aujourd'hui un grand potentiel d'optimisation [42]. Les cellules des tranches de silicium cristallisé sont divisées en deux catégories distinctes, celles en silicium monocristallin et celles en silicium poly cristallin (Figure 2.10). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet un rendement plus élevé, avec près de 24,7% contre un rendement record de 19,8% sur une petite cellule en laboratoire [43].



Fig(2.10.a.) : Cellule PV monocristallin
cristalline

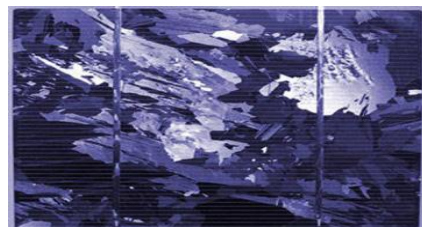


Fig (2.10.b) : Cellule PV poly
cristalline

2.4.5.2. Cellules amorphes

Les cellules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien inférieur, mais malheureusement, leur rendement n'est actuellement que de 6 à 8%. Cette technologie permet d'utiliser de très fines couches de silicium appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [26]. Les cellules solaires organiques restent à l'état de recherche. Les meilleurs rendements pour des cellules sont de 5 % et il n'y a pas vraiment de modules. Elles sont potentiellement très économiques et ne sauraient être négligées à moyen terme même si l'encapsulation pour lutter contre l'oxydation sera essentielle. Les cellules à colorants (dites parfois Grätzel) sont aussi à bas coûts. Les rendements sont meilleurs avec 11 % mais le vieillissement de ces cellules semble problématique. Ajoutons que depuis quelques années les recherches sur des couches minces poly cristallines ont beaucoup progressé [44, 45, 46]. On note la prédominance d'une filière malgré la diversité des technologies. Les cellules solaires à base de silicium cristallin ou poly cristallin représentent la technologie la plus ancienne et pourtant encore dominante.

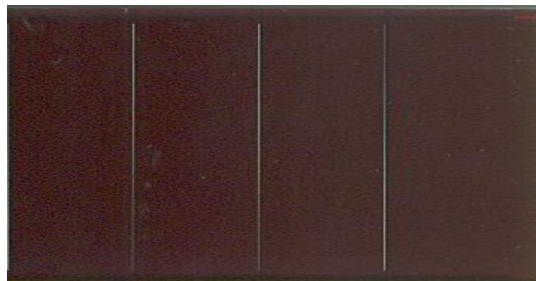


Figure (2.11) : Cellule photovoltaïque amorphe

2.4.6. Modules (ou panneaux) PV :

Les cellules solaires sont sélectionnées et connectées en série pour augmenter la tension de fonctionnement. Pour éviter les risques de fuites dans les installations haute tension, une distance suffisante est recommandée entre le cadre métallique et les cellules. De plus, il est recommandé de placer une diode parallèle toutes les 18 cellules pour éviter les problèmes de points chauds lors d'occultations partielles d'une cellule. Pour la protection contre les effets climatiques et mécaniques, les cellules PV sont encapsulées entre une vitre en verre spécial antireflet micro-structuré à transmission élevée et à l'avant, ainsi qu'un film plastique à base d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou de polyfluorure de vinylidène (PVF) à l'arrière,

recouvert d'une feuille de Tedlar-Aluminium-Tedlar ou de polyéthylène. Il existe de nombreux autres types d'encapsulant, en particulier pour les films minces qui ne nécessitent pas la fonction de revêtement nécessaire pour les cellules épaisses. En outre, lorsque le verre n'est pas absolument nécessaire, et en particulier pour les applications mobiles, plusieurs types de polymères fluorés ont été développés pour servir de face avant protectrice transparente et flexible. Le résultat de cet assemblage constitue le panneau photovoltaïque, également appelé module. Dans un module, les cellules sont connectées électriquement à des unités de quelques dizaines de watts. Les modules PV sont les principaux éléments commerciaux du marché photovoltaïque. Ils sont classés en fonction de la puissance fournie dans des conditions de test standardisées. Ces conditions sont $1\text{kW} / \text{m}^2$ de rayonnement solaire et une température de cellule PV de 25°C . Les modules solaires ont une durée de vie moyenne de 20 à 40 ans. La plupart des fabricants de panneaux garantissent une délivrabilité de 80% des modules après 25 ans d'exploitation. Les modules PV sont intégrés dans des systèmes conçus pour des applications spécifiques [47].

2.4.6.1. Association de modules solaires

a) Association série :

Ce type d'association est généralement utilisé pour dériver une tension significative car l'association en série des photocellules fournit une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une cellule unique et à la caractéristique d'un groupe. On trouvera ci-dessous deux exemples de modules solaires pouvant être généralisés sur une gamme de "n" modules solaires en série.

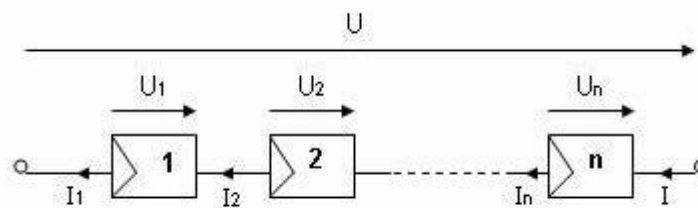


Figure (2.12) : Association série

b) Association parallèle

Ce genre de groupement augmente le courant, la caractéristique équivalente sera alors la même que dans le cas précédent, sauf qu'ici la tension reste à titre près constante et égale à celle d'une cellule.

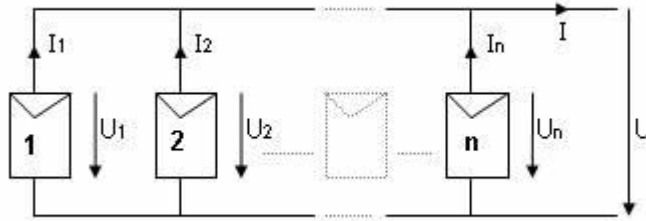


Figure (2.13) : Association parallèle

c) Association mixte (Série+parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte c'est-à-dire Série-parallèle.

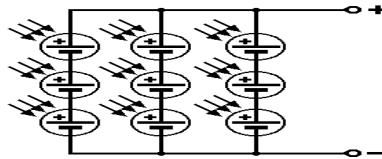


Figure (2.14) : Association mixte (Série+parallèle)

2.5. Les systèmes photovoltaïques

2.5.1. Définition d'un système PV :

Un système photovoltaïque est constitué de plusieurs parties. Il se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants permettant d'adapter l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charge, injection dans le réseau). Cet ensemble, également appelé "Balance du système" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de module et la charge finale [48].

2.5.2. Les différentes Structures de systèmes photovoltaïques :

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque:

2.5.2.1. Le système à bus continu intermédiaire :

Le générateur photovoltaïque est connecté via un convertisseur DC-DC. Un onduleur délivre une tension modulée, il est filtré pour réduire le taux d'harmoniques, puis on obtient à la sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue provenant du générateur photovoltaïque en une tension utilisable sinusoïdale (230V) [48].

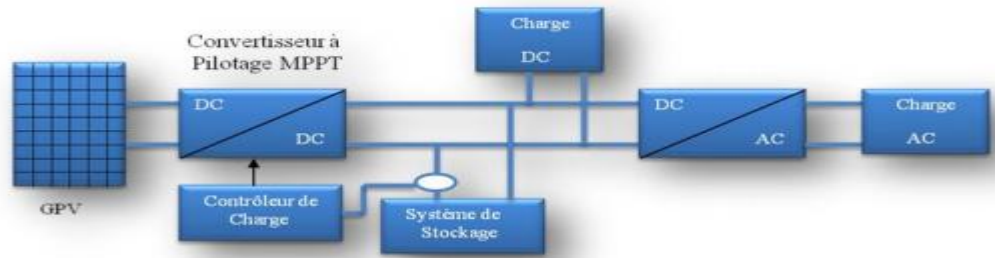


Figure (2.15) : Installation photovoltaïque autonome [49]

2.5.2.1.1. Structure avec convertisseur forward

Dans cette structure un convertisseur forward capable d'augmenter la tension série du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension souhaitée). L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc pas nécessaire, la conversion alternative continue est relativement simple, grâce à un onduleur centralisé figure (2.16). Les principaux inconvénients de cet assemblage sont [48]:

La capacité doit être relativement grande, en raison de l'ondulation du courant à la sortie du module. Le bus continu supportera signal en créneau qui induira une émission importante d'ondes électromagnétiques et éventuellement une perte par fuite. L'induction du transformateur inclus dans le convertisseur générera des pertes par fuite.

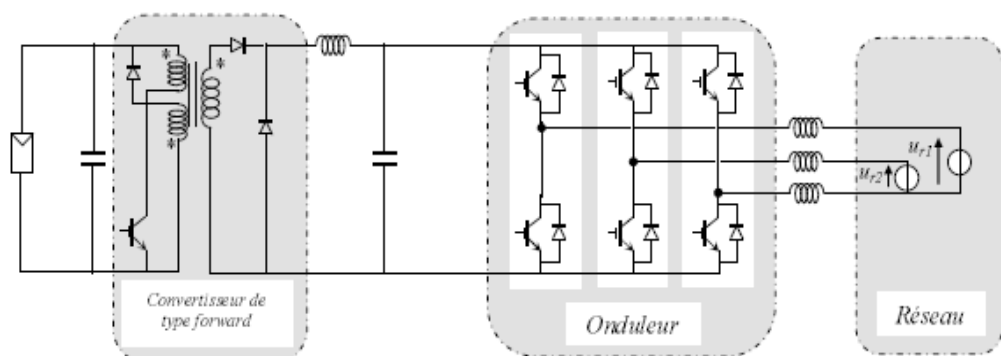


Figure (2.16) : Convertisseur de type forward alimentant le bus continu [48]

2.5.2.1.2. Structure avec convertisseur de type fly-back

Cette structure est basé sur un convertisseur de type Fly-back qui augmente la tension sortie du module photovoltaïque au niveau de tension souhaité figure (2.17). La caractéristique principale du Fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique. Le hacheur est contrôlé pour obtenir le maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure un transfert de tension et de puissance constant vers le réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et augmente le coût d'installation [48].

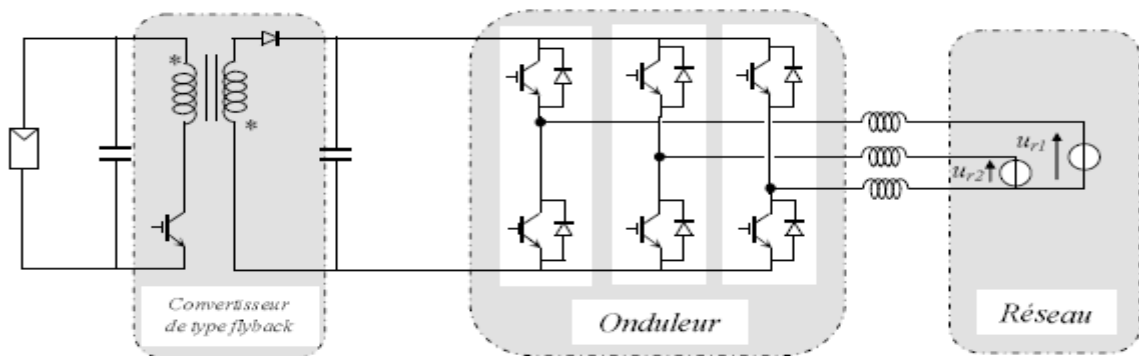


Figure (2.17) : Structure avec convertisseur de type Fly-back [48]

2.5.2.1.3. Structure avec hacheur et onduleur

La figure (2.18) représente un hacheur qui élève la tension de sortie du module photovoltaïque à une tension de (100 V) fournie sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'augmenter la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inducteur. Un onduleur est ajouté pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau souhaité (en fonction du réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie "production" et la partie "utilisation". L'avantage de ce système est que les batteries peuvent être facilement connectées au bus cc pour un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pourquoi la capacité peut être faible [48].

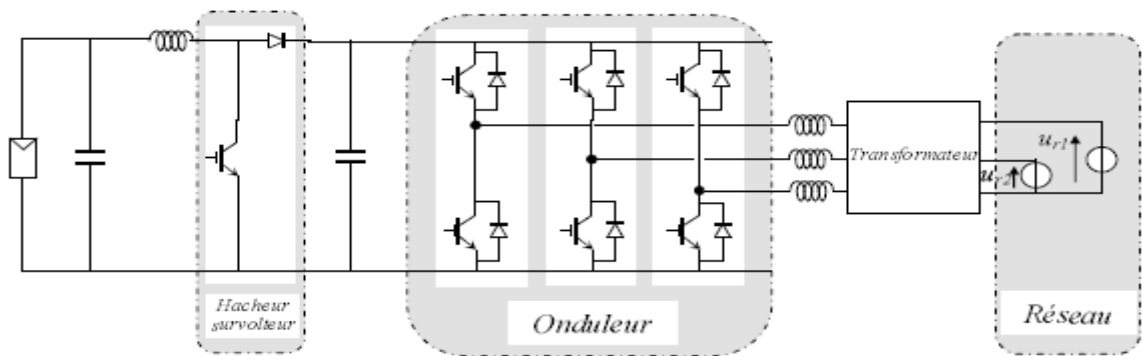


Figure (2.18) : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [48]

2.5.2.2. Les systèmes à connexion directe au réseau :

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique figure (2.19).

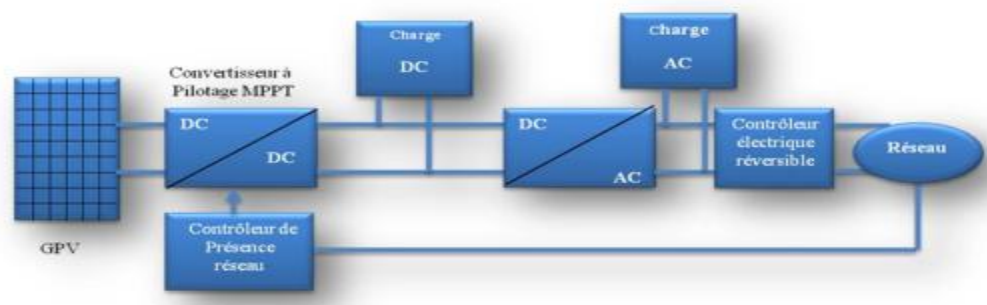


Figure (2.19) : Installation photovoltaïque couplée au réseau [49]

2.5.2.2.1. Structure à convertisseur unique

Le dispositif présenté par la Figure (2.20) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. On associe plusieurs modules photovoltaïques en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau. L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus, le contrôle du point de puissance maximum de la puissance est voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement [48].

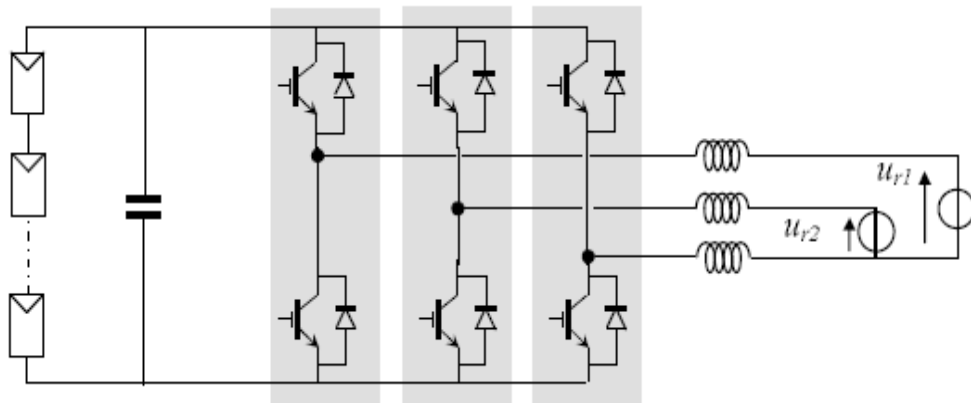


Figure (2.20) : Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur [48]

2.5.2.2.2. Structure avec bus à basse tension alternative

La figure (2.21) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V – 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité des personnels. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes par effet joule. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par les modules (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement [48].

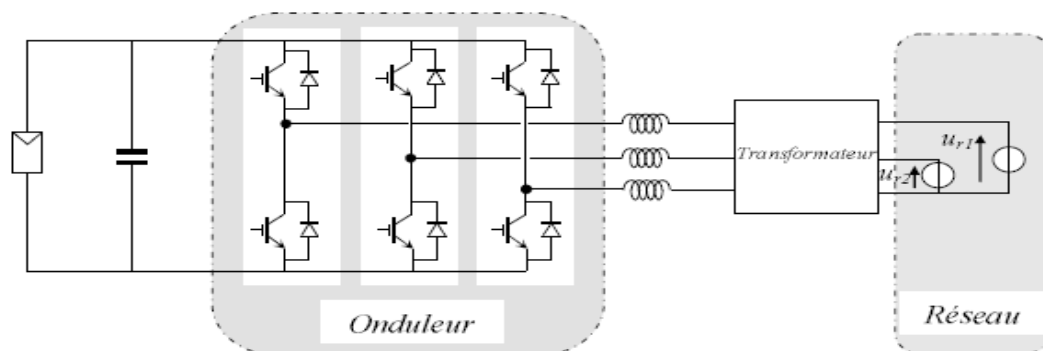


Figure (2.21) : Bus à basse tension alternative [48]

2.5.3. Topologies des systèmes PV

Nous allons présenter dans la suite les architectures de systèmes PV permettant la connexion au réseau de distribution, en s'intéressant principalement à la fonction de base « conversion ». Une grande diversité de topologies de systèmes PV existe, nous présenterons uniquement les plus utilisées et les plus intéressantes.

2.5.3.1. Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)

La topologie la plus ancienne et la plus classique est composée d'un seul onduleur réalisant l'interface entre le réseau et le champ photovoltaïque, où des chaînes de modules (ou "string") sont connectées en parallèle figure (2.22) [50]. Ce montage est généralement utilisé pour des installations de grandes puissances (20-400 kW [51]) dans lesquelles des protections anti-retour de courant sont implantées par rangée. [50]

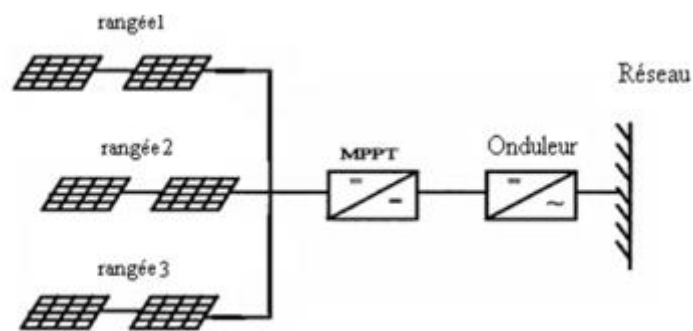


Figure (2.22) : La topologie « Onduleur Central » [52]

Avantages

- Simplicité de mise en œuvre : un seul onduleur connecté au champ photovoltaïque est nécessaire.
- Le faible coût d'investissement.
- Une maintenance simple.
- La simplicité du montage permet également un meilleur rendement de la conversion de la tension.
- La mise en série de plusieurs modules permet d'obtenir un rapport de transformation faible, ce qui augmente le rendement du convertisseur.

Limites

- Pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules).

- Pertes et risques électriques dans le câblage.
- Aucune évolutivité.
- Aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance.

2.5.3.2 Topologie avec onduleur de rangé (string inverter)

L'une des topologies les plus utilisées est l'onduleur rangée Figure (2.23), qui consiste à implanter un onduleur à la fin de chaque chaîne. Les onduleurs sont alors connectés en parallèle au réseau électrique, ce qui nécessite une coordination entre les onduleurs (de type maître-esclave) afin d'interdire le fonctionnement en îlotage et d'éviter les échanges d'énergie entre les onduleurs [50].

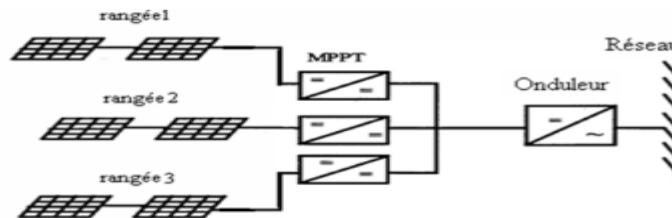


Figure (2.23) : La topologie « Onduleur de rangée » [52]

2.5.3.3. Topologie avec onduleur Multiple-string

Le hacheur "rangée", aussi appelé convertisseur multi-string, utilise un hacheur en bout de chaque string du système PV [50]. La figure (2.24) montre le schéma fonctionnel d'un système de conversion de multiple convertisseur (multiple-string). Il se comporte d'un ensemble de modules reliés en série du côté (DC), et la conversion individuelle de la puissance de (DC) en (AC) est assurée par un petit onduleur [53].

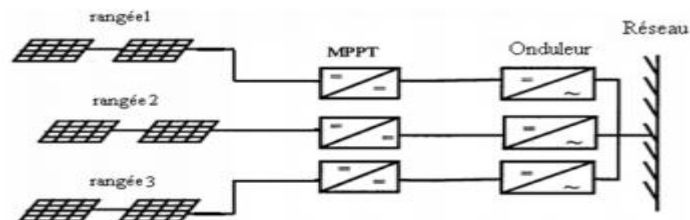


Figure (2.24) : Hacheur (Multiple-string DC-DC) et l'onduleur [52]

2.5.3.3. Topologie avec onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

Dans les systèmes d'onduleur modulaire de la figure (2.25), chaque module photovoltaïque aura un petit onduleur (typiquement 50W à 300W) et aucun câblage n'est requis. On prévoit de petits onduleurs pour réduire le coût [52].

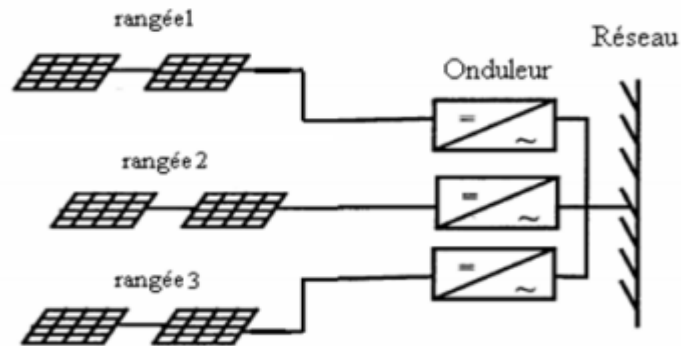


Figure (2.25) : Onduleur modulaire (Module-integrated inverter) [52]

2.6. Principaux impacts générés par les installations photovoltaïques sur les réseaux BT

Lorsque le niveau de pénétration du système PV augmente, cela a un impact négatif sur le réseau de distribution. En outre, il sera responsable du nombre de problèmes de qualité de l'alimentation. Cette section donne l'introduction d'impacts dus au système PV sur le réseau de distribution.

2.6.1. Elévation locale du niveau de tension

Les variations de tension d'un réseau électrique dépendent des caractéristiques de ce réseau ainsi que du nombre et de la nature des installations électriques raccordés à ce réseau. Les installations consommatrices d'énergie auront tendance à provoquer des baisses de tension alors que les installations de production auront tendance à générer des hausses de tension. Cela implique de la part de la production décentralisée de faire un choix en termes de gestion du plan de tension. Ces élévations de tension seront d'autant plus notables qu'il y aura beaucoup de PV et peu de charges, figure (2.26) [54].

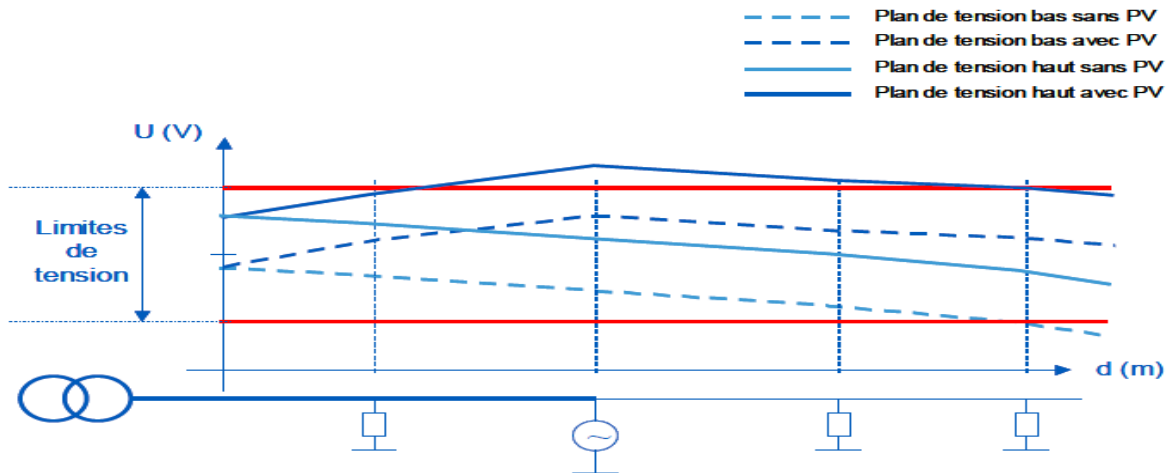


Figure (2.26) : Variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV [54]

Ce phénomène de hausse localisée de la tension est le principal impact des installations photovoltaïques sur les réseaux de distribution BT. Il peut être pris en compte et limité de différentes façons :

- En limitant le nombre des utilisateurs ou la puissance totale d'injection d'un départ afin de conserver en tout point du réseau une tension inférieure à la tension maximale admissible [55],
- En modifiant la conception des réseaux BT pour prendre en compte la présence d'installations photovoltaïques. Cette prise en compte consiste notamment à régler la tension en tête des départs BT à un niveau plus faible qu'habituellement et à conserver une section de câble identique sur toute la longueur de la portion du réseau [56]. Cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de laisser moins de marge aux chutes de tensions admissibles dans le départ concerné,
- En autorisant le raccordement d'un nombre important d'installations photovoltaïques sous réserve que les onduleurs soient équipés d'une fonction de limitation de la puissance injectée lorsque l'élévation de la tension du réseau devient trop forte [57],
- En autorisant le raccordement d'un nombre important d'installations photovoltaïques sous réserve que les onduleurs soient équipés d'une fonction de réglage de la puissance réactive adapté au problème de tension.

2.6.2. Courant d'appel

La petite différence inévitable entre les systèmes photovoltaïques et les tensions du réseau peut introduire un courant d'appel qui circule entre le système photovoltaïque et le réseau de

distribution au moment de la connexion et décroître à zéro à une vitesse exponentielle. Le courant d'appel produit peut provoquer des déclenchements intempestifs, des contraintes thermiques et d'autres problèmes [58].

2.6. 3. Flux de puissance inverse

Dans le système de distribution, le flux d'énergie est généralement unidirectionnel du système moyen tension au système basse tension. Cependant, à un niveau de pénétration élevé des systèmes photovoltaïques, il arrive parfois que la production nette soit supérieure à la demande nette, en particulier à midi, de sorte que le sens du flux de puissance est inversé et que le courant passe du côté basse tension sur le côté Moyenne Tension. Ce flux de puissance inversé entraîne une surcharge des départs de distribution et des pertes de puissance excessives. Il a également été rapporté que le flux inversé de puissance affectait le fonctionnement des régulateurs de tension automatiques installés le long des départs de distribution, car les réglages de tels dispositifs doivent être modifiés pour tenir compte du déplacement du centre de charge. Un flux de courant inversé peut avoir des effets néfastes sur les changeurs de prises en ligne des transformateurs de distribution, en particulier s'ils appartiennent au type de résistance à pont unique [59].

2.6. 4. Sécurité

La sécurité est l'une des préoccupations majeures des systèmes photovoltaïques en raison de la mise en îlotage involontaire au moment de la survenue de la panne côté réseau. Dans ce cas, les systèmes photovoltaïques continuent à alimenter la charge même après la déconnexion du réseau électrique, ce qui peut entraîner un choc électrique chez les travailleurs [60].

2.6.5. Fluctuation de la puissance de sortie

La fluctuation de la puissance de sortie des systèmes photovoltaïques est l'un des principaux facteurs susceptibles de poser de graves problèmes de fonctionnement pour le réseau de distribution. Les fluctuations de puissance sont dues aux variations de l'irradiance solaire causées par le mouvement des nuages et peuvent durer quelques minutes ou quelques heures, en fonction de la vitesse du vent, du type et de la taille des nuages qui passent, de la zone couverte par le système photovoltaïque et de la topologie du système PV. . Les fluctuations de puissance peuvent provoquer des fluctuations de puissance dans les lignes, des surcharges et des sous-charges, des fluctuations de tension inacceptables et des scintillements de tension [61].

2.6. 6. Déséquilibre de phase

Il est fréquent que des installations photovoltaïques raccordées au réseau triphasé soient constituées d'onduleurs monophasés. Si la puissance de production n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT. Ce phénomène est mis en évidence dans plusieurs études [62].

2.6. 7. Harmonique

La distorsion harmonique est l'un des problèmes sérieux de qualité de l'alimentation liés à l'utilisation des onduleurs de puissance pour convertir le courant continu en courant alternatif dans les systèmes PV. L'harmonique provoque la situation de résonance, une surchauffe dans les batteries de condensateurs et un fonctionnement erroné des dispositifs de protection, etc. la fiabilité du système d'alimentation [63].

2.6.8. Fluctuation de fréquence

La fréquence est l'un des facteurs les plus importants de la qualité de l'alimentation. Tout déséquilibre entre la puissance produite et la puissance consommée peut entraîner des fluctuations de fréquence. La petite taille des systèmes photovoltaïques rend la fluctuation de fréquence négligeable par rapport aux autres ressources basées sur les énergies renouvelables. Cependant, ce problème peut devenir plus grave en augmentant les niveaux de pénétration des systèmes PV. Les fluctuations de fréquence peuvent modifier la vitesse d'enroulement des moteurs électriques et endommager les générateurs [64].

2.6. 9. Problème d'interférence électromagnétique

La fréquence de commutation élevée des onduleurs de systèmes photovoltaïques peut entraîner des interférences électromagnétiques avec des circuits voisins, tels que des batteries de condensateurs, des dispositifs de protection, des convertisseurs et des liaisons CC, entraînant un dysfonctionnement de ces dispositifs [65].

2.7. Systemes photovoltaïques : avantages et limites

2.7.1. Avantages

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- ✓ Ils sont de fonctionnement sûr, non polluants et silencieux;
- ✓ Ils sont très fiables;
- ✓ Ils n'exigent presque aucun entretien;

- ✓ Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales;
- ✓ Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité;
- ✓ Ils vous donnent une autonomie accrue – fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité.

2.7.2. Limites

Vous devriez être également conscient des limites pratiques des systèmes PV :

- ✓ Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage. Si vous souhaitez utiliser l'énergie solaire à cette fin, considérez d'autres solutions de recharge comme un chauffe-eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement.
- ✓ Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle au Canada. Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux, le choix d'un système photovoltaïque dépend souvent d'une décision personnelle axée sur le style de vie – tout comme le type de maison ou de voiture que vous pourriez avoir.

2.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé de manière brief les différentes technologies de cellules photovoltaïques ainsi que son regroupement en modules, les différentes applications photovoltaïques, que soit pour des applications autonome ou raccordée au réseau public. Également les principaux impacts générés par les installations photovoltaïques sur les réseaux BT.

Références bibliographiques

- [25] Mekemeche Abdelkader, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [26] NAIM, Hocine, « Étude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran, 2016.
- [27] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/1/ChapitreI.pdf> .
- [28] Sahouane, Nordine, « Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel », Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen 2016.
- [29] Miloud, Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités », Thèse de Doctorat en Physique. Université de Mostaganem, 2016.
- [30] M. Angel, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, Septembre, 2006.
- [31] A. Labouret, M. Viloz "Energie solaire photovoltaïque" Le manuel du professionnel, Paris, 2003.
- [32] A. Lauger J-A. Roger Technique et documentation « les photopiles solaires », Année 1981.
- [33] Belkaid, Abdelhakim, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2018.
- [34] M. Oukachmih, « Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques », Thèse de Doctorat en électronique option matériaux, technologies et composants, université Paul Sabatier, 2003.
- [35] Boccaletti, C., et al. "Energy models for standalone power systems." EETI-5th International Congress on Energy. 2004.

- [36] Hadji, Slimane. Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque.», Thèse de Doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018.
- [37] Toumi, Sihem, « Etudes des composants électroniques (cellules solaires, diodes schottky) en utilisant les algorithmes génétiques et le langage VHDL AMS», Thèse de Doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, 2012.
- [38] MEENA AGGARWAL, A. KAPOOR, K.N. TRIPATHI, "Solar cell array parameters", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 45, pp 377-384 , 1997.
- [39] R. Chenni, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », Thèse de Doctorat en sciences en physique énergétique, Université De Constantine, 2007.
- [40] Walker, Geoff. "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model." Journal of Electrical & Electronics Engineering 21.1 (2001): 49-56.
- [41] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, Member, IEEE, And Nicholas C. Voulgaris, « Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system», IEEE transactions on power electronics, 2001.
- [42] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, université de Toulouse, Janvier 2009.
- [43] J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, « A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping »,IEEE transactions on electron devices, Vol. 46, No. 10, October 1999.
- [44] C. G. Justus, W. R. Hargraves et A. Yalcin, « Nationwide assessment of potential output from wind powered generators », Journal of applied meteorology, Vol. 15, Pp.673–678, 1976.
- [45] Nachida Kasbadji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique eolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie», Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen, 2006.
- [46] J. P. Hennessey, Jr. Some, « Aspects of wind power statistics», Journal of applied meteorology, vol.16, pp. 119–128, 1977.

[47] Bencherif Mohammed, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension », Thèse de Doctorat en science, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen ,2015.

[48] Yann Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, école normal supérieur d'art et métiers, 2004.

[49] Khenfer Riad, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes a base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques », Thèse de Doctorat .Université Ferhat Abbas - Sétif 1,2015.

[50] Stéphane Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.

[51] Protin, Ludovic, and Stephan Astier. "Convertisseurs photovoltaïques." Techniques de l'ingénieur. Génie électrique 5.D3360 (1997): D3360-1.

[52] Irwin, J. David, and H. RASHID MUHAMMAD. "Power electronics handbook." University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright (2001).

[53] Menadi, Abdelkrim, «Commande Par Les Techniques Intelligentes D'un Système Photovoltaïque Connecté Au Réseau», Thèse de Doctorat, Universite Mohamed Khider Biskra, 2016.

[54] H. Colin , C. Duvauchelle , G. Moine ,Y. Tanguy, B. Gaidon, T. Tran-Quoc , « Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique a basse tension », cadre réglementaire, impacts et préconisations, Esprit,2010.

[55] Arrêté du 24 décembre 2007 pris en application du décret no 2007-1826 du 24décembre 2007 relatif aux niveaux de qualité et aux prescriptions techniques en matière de qualité des réseaux publics de distribution et de transport d.'électricité.

[56] "Recommendations for Utilities." IEE PV Upscale, WP4-Deliverable 4.4, 2008.

[57] Y. Ueda (Tokyo University) , « Detailed performance analyses results of grid-connected clustered pv systems in Japan–first 200 systems results of demonstrative research on clustered PV systems », 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 2005.

- [58] Kageyama, H, T. Yamada, T. Oozeki, K. Kato, and Y.Hishikawa, « Measurement of inrush-current waveforms for modelling reactance characteristics of pv modules, In 26th european photovoltaic solar energy conference and exhibition, 2011. P. 3430-3433.
- [59] Thomson, M., and D. G. Infield. "Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems." IET Renewable Power Generation 1.1 (2007): 33-40.
- [60] SHARMA, Shivani et PAREKH, B. R. Impact of pvps (photovoltaic power system) connection to grid in urban areas. In: National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology. 2011. p. 1-5.
- [61] Eltawil, M.A. and Z. Zhao, « Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2010), No.1, 112-129.
- [62] «State of the art on dispersed PV power generation: publications review on the impact of PV Distributed Generation and Electricity networks», IEE PV Upscale, WP4-Deliverable 4.1, 2007.
- [63] Farhoodnea, M., A. Mohamed, H. Shareef, and H.Zayandehroodi, «An enhanced method for contribution assessment of utility and customer harmonic distortions in radial and weakly meshed distribution systems», International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 43 (2012), No.1, 222-229.
- [64] Masoud .F, Azah .M, Hussain. S, Hadi. Z, « Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks», Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 2a/2013.
- [65] F. Katiraei, K. Mauch, and L. Dignard-Bailey, « Integration of photovoltaic power systems in high-penetration clusters for distribution networks and mini-grids», National Resources Canada, January 2009.

Chapitre 03 :
Système de production d'électricité éolienne



« La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information »

Albert Einstein

3.1. Introduction :	53
3.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	53
3.3. Définition de l'énergie éolienne	54
3.4. Principales composantes d'éolienne	54
3.4.1. Principe de fonctionnement	54
3.4.2. Constitution d'une éolienne	55
3.5. Classement des éoliennes selon l'orientation de leur axe de rotation	56
3.5.1. Éolienne a axe vertical	56
3.5.2. Éoliennes à axe horizontal	57
3.6. Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation	59
3.7. Notions theoriques Sur l'aerogenerateur	60
3.7.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	60
3.7.2. Limite de Betz	61
3.7.3. Coefficient de puissance C_p	62
3.7.4. Couple produit par l'éolienne	63
3.7.5. Vitesse spécifique de l'éolienne	63
3.7.6. Courbes caractéristiques des turbines éoliennes	63
3.8. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	64
3.9. Systemes de régulation de vitesse d'une éolienne	65
3.9.1. Système à décrochage aérodynamique " Pitch "	65
3.9.2. Système à décrochage aérodynamique "Stall"	66
3.10. Etat de l'art sur les generateurs et les convertisseurs utilisées dans les systemes éolien	67
3.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	67
3.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil	67
3.10.1.2. Machine asynchrone à double stator	68
3.10.1.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	69
3.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	71
3.10.2. 1.Machine synchrone à rotor bobiné	72
3.10.2.2. Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)	73
3.10.3. Comparaison entre les différentes machines :	77
3.11. Impact de l'integration d'éoliennes dans un réseau électrique BT	78
3.11.1. Fluctuation de tension	78
3.11.2. Variation de la fréquence	79
3.11.3. Harmoniques et inter-harmoniques	79

51

3.12. Modélisation et simulation du système de conversion d'énergie éolienne a base d'une MADA connectée au reseau BT	79
3.12.1 Description du système	80
3.12.2. Modèle du vent	80
3.12.3. Modélisation de la turbine	81
3.12.4. Modèle du multiplicateur	81
3.12.5. Modèle de l'arbre	82
3.12.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	82
3.12.3.1. Hypothèses simplificatrices	83
3.12.6.1. Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA	83
3.12.7. Modèle de la mada dans le plan (d, q)	85
3.13.7.1.La transformation de park	85
3.12.7.2.Application de la transformation de park	85
3.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	87
3.14. Conclusion	88

3.1. Introduction :

Face aux exigences mondiales pour la protection de l'environnement et la préservation de la biodiversité des milieux naturels, la production de l'énergie électrique est assurée de plus en plus à base des énergies renouvelables, notamment : l'éolien, photovoltaïque, géothermique, marine et l'hydraulique. Grâce au potentiel énergétique important de l'énergie éolienne, elle est devenue la source d'énergie renouvelable la plus souvent utilisée après l'hydraulique. [66]. De plus, la capacité d'énergie éolienne mondiale connaît une croissance rapide et est devenue la filière d'énergie renouvelable à plus fort taux de croissance [67]. Divers concepts d'éoliennes ont été développés et différents générateurs ont été utilisés dans la recherche et la commercialisation afin d'utiliser plus efficacement cette énergie.

3.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne :

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Ce n'est qu'au moyen âge qu'ils font leur apparition en Europe et leur utilisation se répand rapidement. Cependant, avec la découverte de nouvelles sources d'énergie, telles que les hydrocarbures, l'exploitation de l'énergie du vent est vite négligée puis abandonnée, [68]. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [69]. Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale à une grande échelle [68]. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985 [68]. Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui a permis un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [68]. Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie

utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés). Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [70].

3.3. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins:

- **La transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **La production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation [71].

3.4. Principales composantes d'éolienne

3.4.1. Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [72] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

La figure (3.1) montre le principe de fonctionnement général d'une éolienne. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

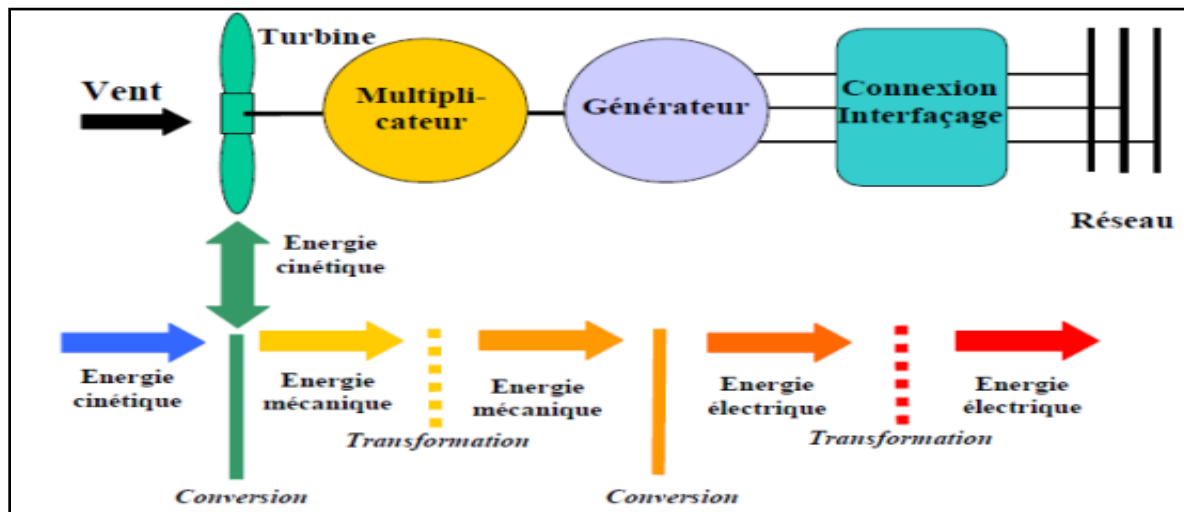


Figure (3.1): Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, [73]

3.4.2. Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure (3.2) :

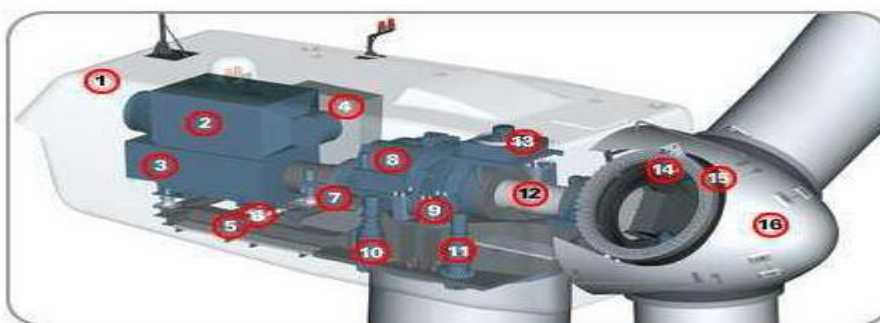


Figure (3.2): Architecture d'une éolienne [74]

Un mât, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (2). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de

refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (13). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile. La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent [73].

3.5. Classement des éoliennes selon l'orientation de leur axe de rotation :

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent [75].

3.5.1. Éolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [75]. Ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [76].

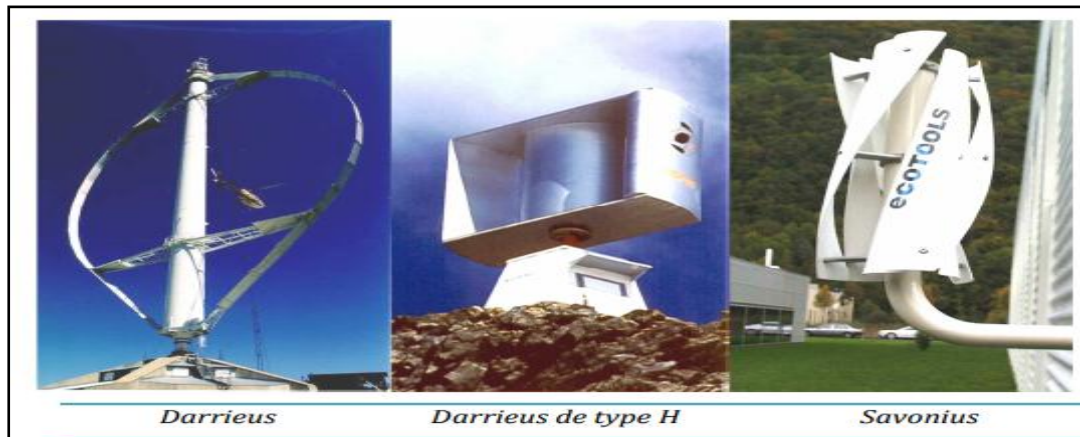


Figure (3.3): Technologie éolienne à axe vertical [77]

3.5.1. 1. Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

3.5.1. 2. Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

3.5.2. Éoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [77].

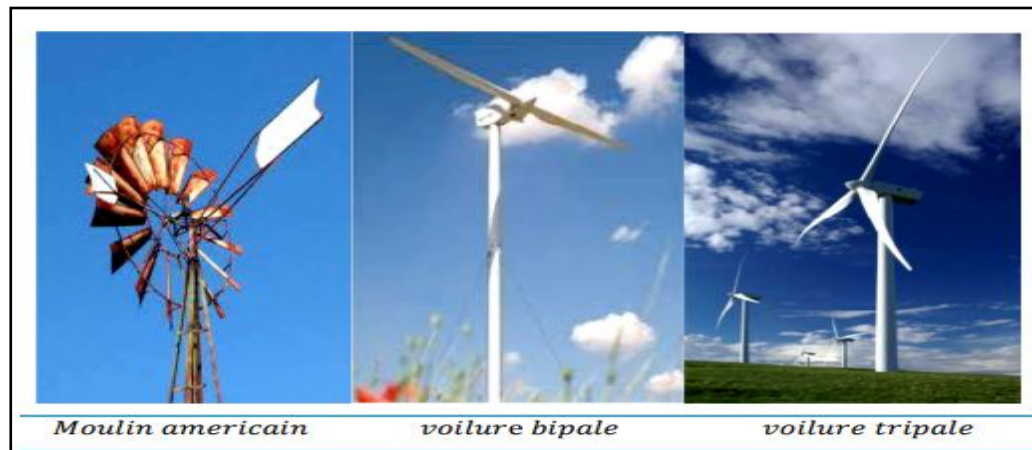


Figure (3.4): Technologie éolienne à axe horizontale [77]

3.5.2.1. Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

3.5.2.2. Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [75].

Le tableau 3.1 résume les avantages et les inconvénients de chaque type de turbine. Pour les applications à forte puissance, les éoliennes à axe horizontal (WHE) dominent le marché en raison de leur rendement élevé et de leur accès aux vents violents. Les éoliennes à axe vertical (EAV), en revanche, conviennent mieux aux applications domestiques sur les toits, car elles leur donnent automatiquement accès à des vents violents et sont facilement abordables pour la maintenance [78].

Tableau (3.1) : Comparaison des éoliennes à axe horizontal, et à axe vertical [78]

Types des Turbines	Avantages	Inconvénients
Éoliennes à Axe Horizontal (EAH)	<ul style="list-style-type: none"> • Fort rendement de conversion d'énergie • Accès au vent plus fort • Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle. • Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'au la terre • Systèmes d'orientation requis
Éoliennes à Axe Vertical (EAV)	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface. • Fonctionnement indépendant du sens du vent. • Adéquat pour les toits de d'immeuble 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement moins faible fluctuation • importante du couple et forte vibrations mécaniques • Solutions limitées pour la régulation en

3.6. Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation

Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable. Les premières éoliennes implantées sont des éoliennes à vitesse constante utilisant des génératrices asynchrones liées directement au réseau et c'est la fréquence du réseau qui impose la vitesse de rotation de la machine. Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas un système électronique de commande. Contrairement à cette technologie et avec le développement de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable utilisent des convertisseurs statiques 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 ou bien fournie à une charge dans une installation autonome [79].

Tableau (3.2): Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable [78]

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> • Simple, robuste, fiable. • Faible coût de construction et maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de conversion d'énergie faible. • Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci. • Fluctuation importante de la puissance.
Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> • Fort rendement de conversion d'énergie. • Puissance électrique de meilleure qualité. • Stress mécanique réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs. • Contrôle du système plus compliqué.

3.7. Notions théoriques sur l'aérogénérateur

3.7.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'éolienne est un appareil qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur d , section S , de masse volumique ρ , entraînée par une vitesse v , (voir Figure 3.5) s'écrit [80]:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (3 - 1)$$

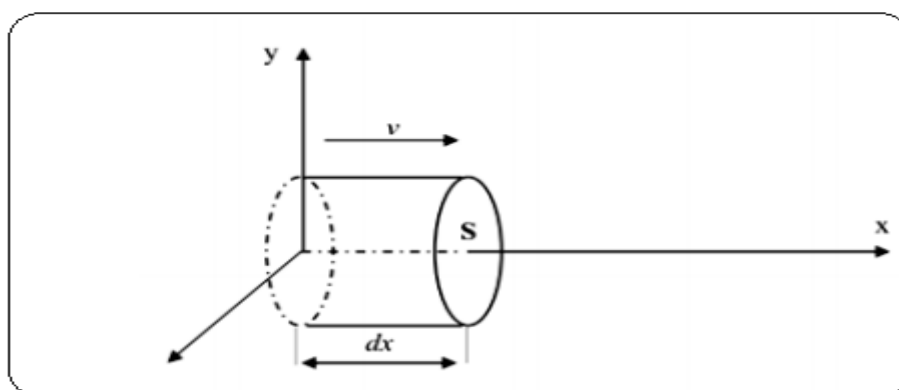


Figure (3.5): Colonne d'air animée d'une vitesse V [80]

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps [80].

En supposant $dx = vdt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 v^3 \quad (3 - 2)$$

- ✓ ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m³) ;
- ✓ v : Vitesse instantanée du vent (m/s);
- ✓ E_c : Énergie cinétique du vent (Joules).

3.7.2. Limite de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [81], [82]. Considérons le système de la figure (3.6) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

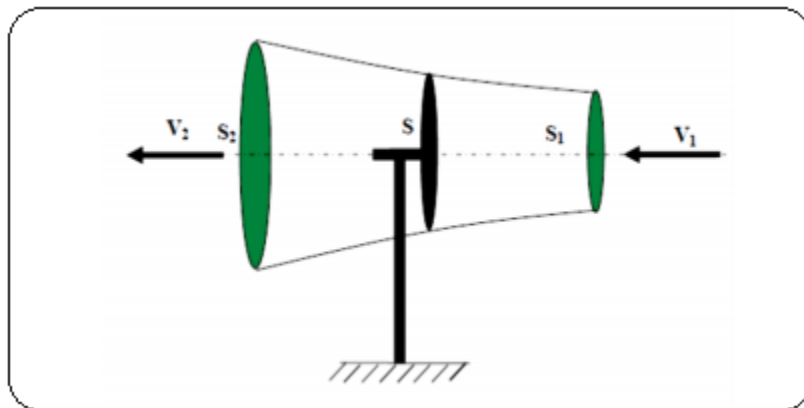


Figure (3.6): Théorie de Betz : schéma de principe [81]

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [81], [82].

$$P_m = \frac{\rho S (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (3 - 3)$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [81].

$$P_m = \frac{m_0(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (3 - 4)$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans (3.5):

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (3 - 5)$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $V_2=0$ dans l'expression (3.5) :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (3 - 6)$$

3.7.3. Coefficient de puissance C_p

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ($S = \pi R^2$ où R =rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse V [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (3 - 7)$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance aérodynamique [83] :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (3 - 8)$$

Ou :

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)}) \quad (3 - 9)$$

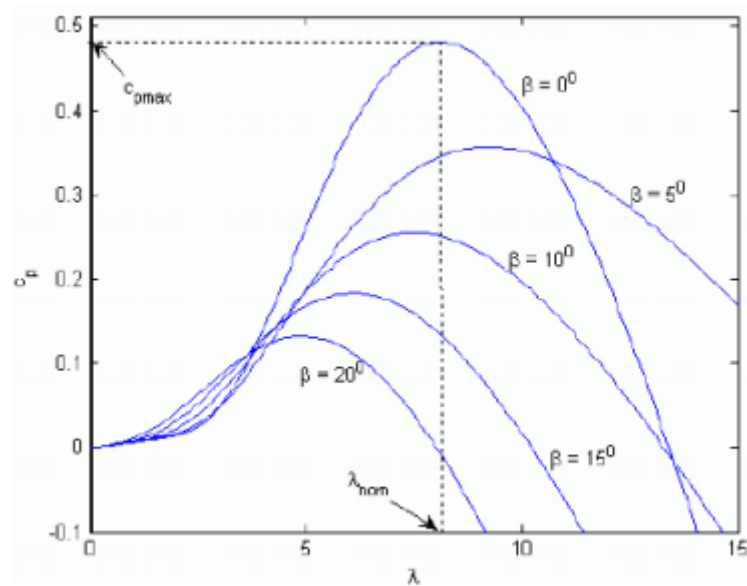


Figure (3.7): Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [84]

3.7.4. Couple produit par l'éolienne

$$\Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (3 - 10)$$

Avec :

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

3.7.5. Vitesse spécifique de l'éolienne

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_{vent}} \quad (3 - 11)$$

3.7.6. Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. Les courbes caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance C_p et de couple C_m en fonction de la vitesse spécifique λ .

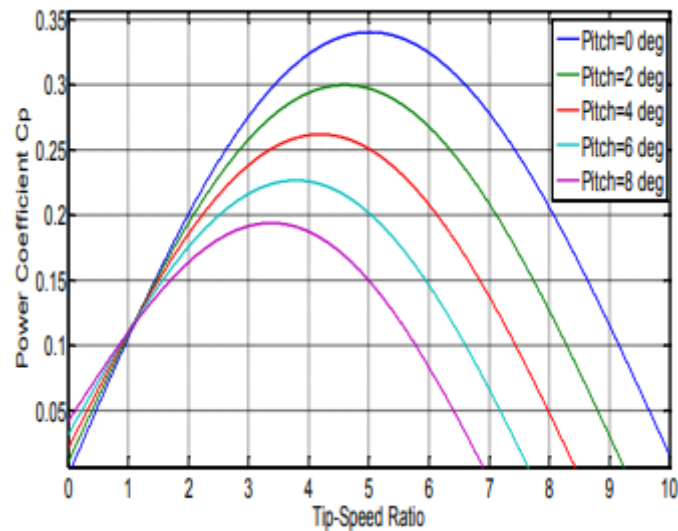


Figure (3.8): Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ [85]

3.8. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

La régulation d'une source éolienne de secours est un facteur primordial pour son bon fonctionnement. Ce système permet d'assurer la sécurité de l'éolienne en cas de trop forte vitesse, mais aussi, de limiter sa puissance pour éviter une détérioration des composants mis en jeu. Cette source éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nécessaire, dénommée puissance nominale P_n . Cette puissance P_n est obtenue à partir de la vitesse V_n (vitesse nominale) du vent relatif. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale V_n du vent relatif, on spécifie aussi :

- Vitesse de démarrage, V_D , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- Vitesse maximale du vent relatif, 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 (Voir Figure 3.9) [86].

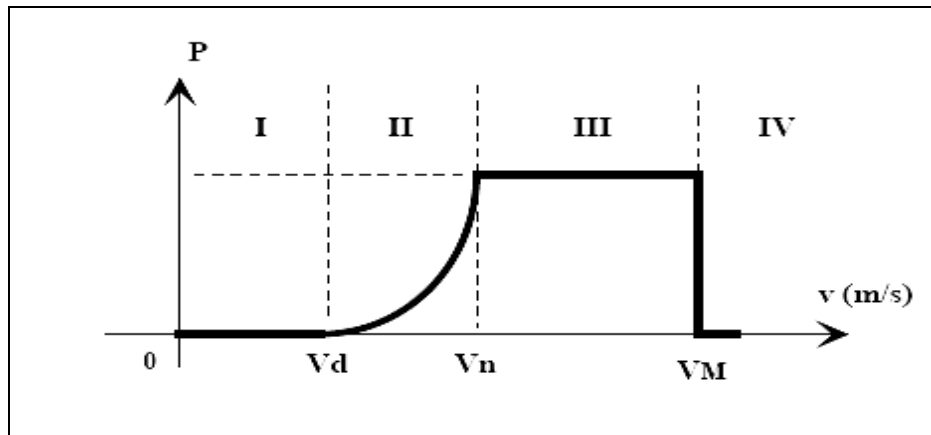


Figure (3.9): Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent
[86, 87]

- Zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- Zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- Zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- Zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

3.9. Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice : [88]

3.9.1. Système à décrochage aérodynamique " Pitch "

Ce système de contrôle fait pivoter les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent, de manière à ce que les pales soient toujours placées à un angle optimal par rapport au vent, de manière à extraire la puissance maximale à tout moment (Fig. 3.10). C'est-à-dire qu'il est nécessaire de faire varier l'angle d'inclinaison des pales pour tirer le meilleur parti du vent instantané et pour limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale[88].

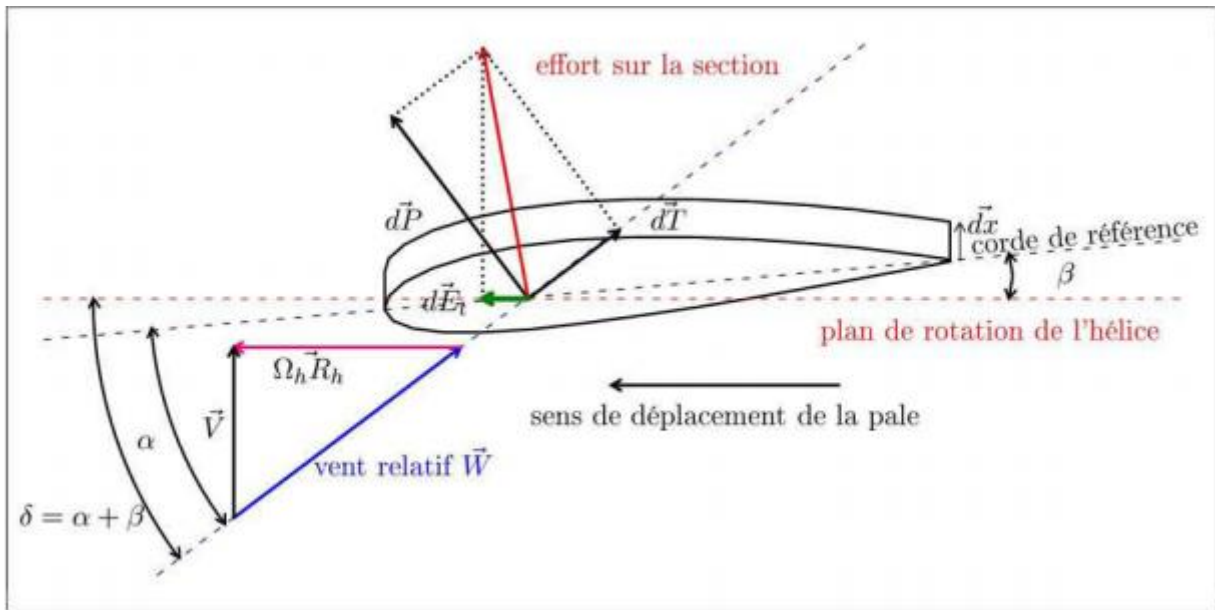


Figure (3.10): Variation de l'angle de calage d'une pale [89]

3.9.2. Système à décrochage aérodynamique "Stall"

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique (Fig3.11) [88].

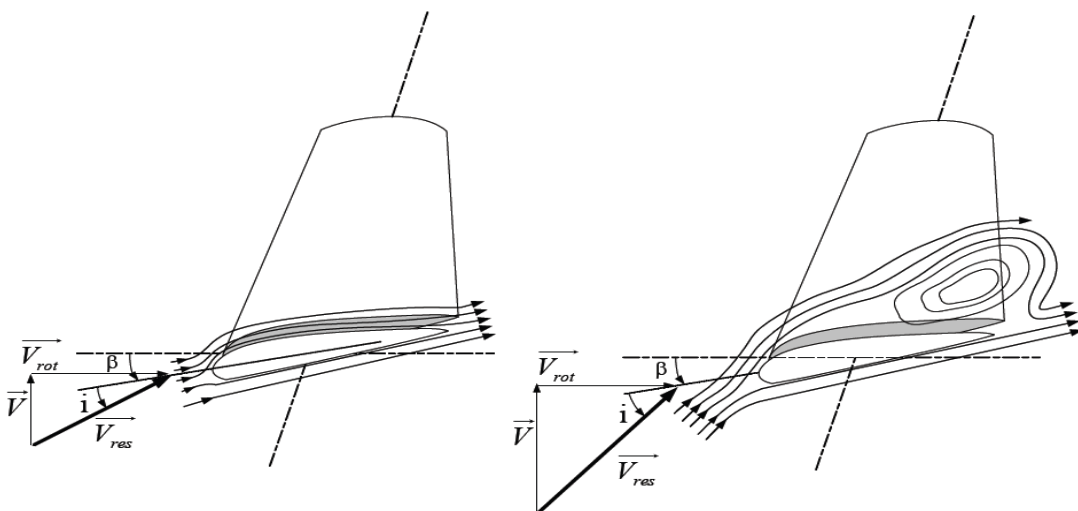


Figure (3.11): Flux d'air sur un profil de pale " Stall " [90]

3.9.3. Système à décrochage aérodynamique "Active Stall"

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation «Stall » et de la régulation « Pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [88].

3.10. État de l'art sur les générateurs et les convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens

Plusieurs chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par des éoliennes. Ils peuvent être très différents de ceux qui utilisent une puissance forte ou faible, un fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable.

3.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

3.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Le générateur asynchrone à cage d'écureuil est largement utilisé dans les éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, de sa simplicité mécanique et de son faible coût. Il a l'avantage d'être standardisé, fabriqué en grande quantité et sur une très grande échelle de puissances. Il nécessite moins de maintenance et ont un très faible taux de défaillance. Dans les grandes éoliennes, la vitesse de rotation est faible. Il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct, Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Une solution consiste à utiliser un convertisseur de fréquence, mais cette solution est généralement coûteuse [91]. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance [92]. Ci-dessous est représentée une chaîne de conversion associée (Figure 3.12).

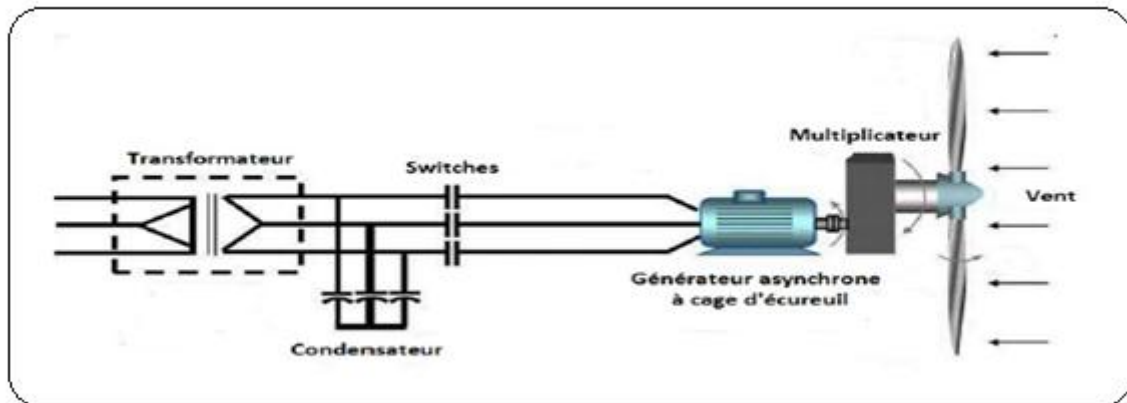


Figure (3.12): Générateur asynchrone à cage d'écureuil [93]

3.10.1.2. Machine Asynchrone à Double Stator [94]

Cette configuration d'éolienne permet un point de fonctionnement à deux vitesses. Une double bobine est appliquée au stator (figure 3.13), ce qui induit un nombre de paires de pôles variables et donc différentes plages de vitesse. Deux vitesses de synchronisme peuvent être imposées en modifiant le nombre de pôles. D'une part, il existe un stator de faible puissance avec un grand nombre de paires de pôles pour des vitesses de vent faibles. En effet, la puissance est donnée par:

$$P_{mg} = C_{em} \Omega_s \quad (3 - 12)$$

Avec : P_{mg} La puissance transmise par la génératrice, C_{em} Le couple électromagnétique, Ω_s La vitesse de synchronisme, ω La pulsation du réseau et p le nombre de paires de pôles. A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (3 - 13)$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs.

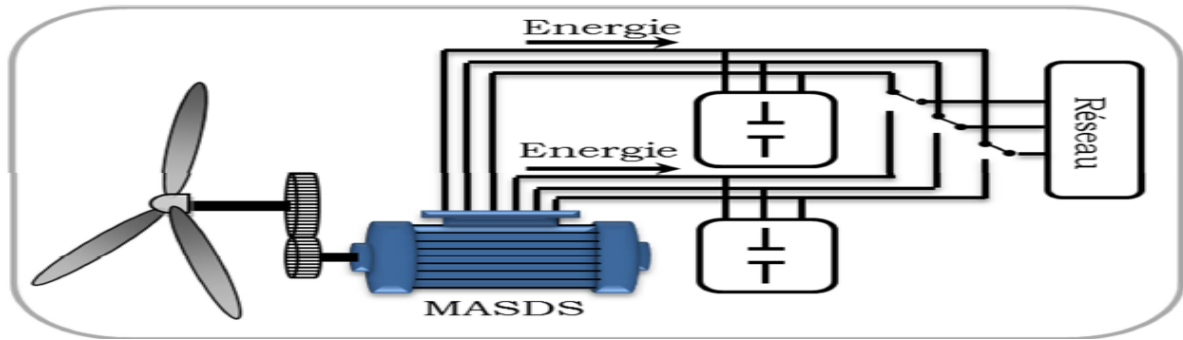


Figure (3.13) : Schéma de l'éolienne avec la MAS à double stator connectée au réseau [77]

3.10.1.3. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant figure (3.14). Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [94]. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse [95]. Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation, chaque structure à ses inconvénients et ses avantages.

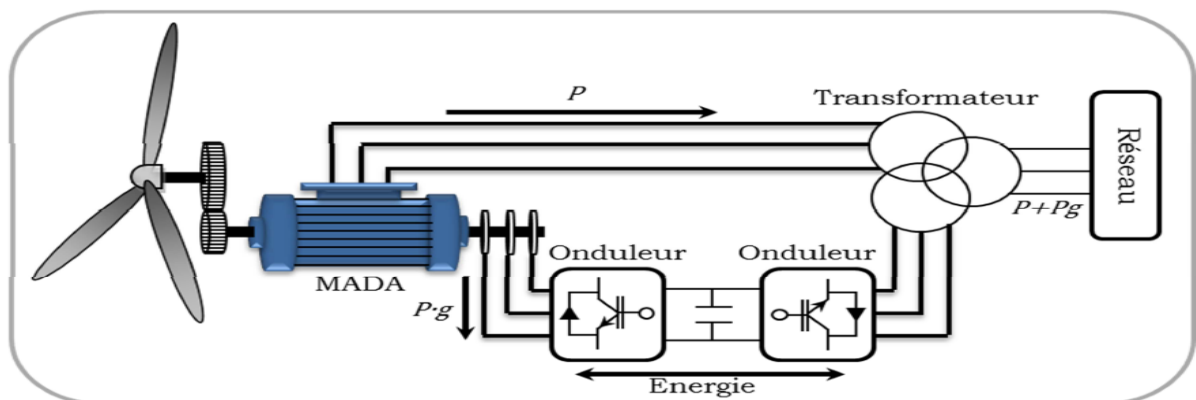


Figure (3.14) : Schéma d'une machine asynchrone pilotée par le rotor [77]

3.10.1.3. a. Machine asynchrone à double alimentation type "Brushless"

Dans cette configuration le stator est composé de deux enroulements. L'un des enroulements est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le deuxième enroulement, dont la section des conducteurs est inférieure, permet de faire varier les courants

d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement au réseau et le convertisseur est placé entre le stator faible puissance et le réseau (Figure 3.15) [94].

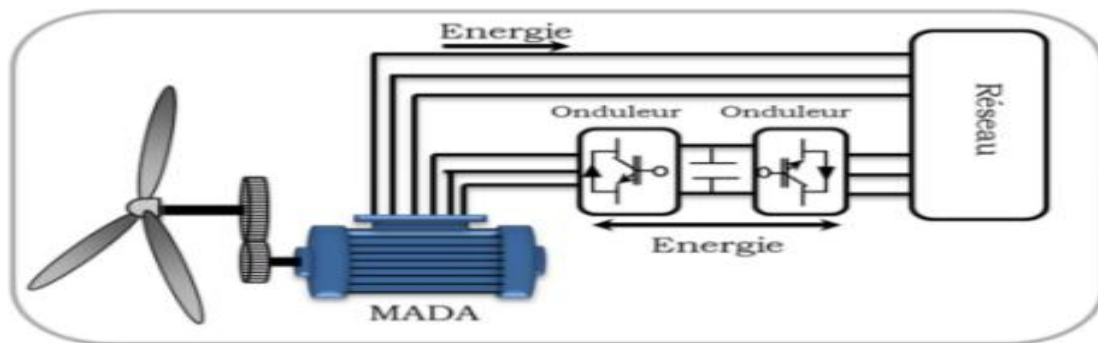


Figure (3.15): Machine asynchrone brushless connectée au le réseau [90]

3.10.1.3. b. Machine asynchrone à double alimentation (structure de Kramer)

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur (la Figure. 3.16), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine [94].

Cette structure est appelée structure a base de pont a diode et pont a thyristors

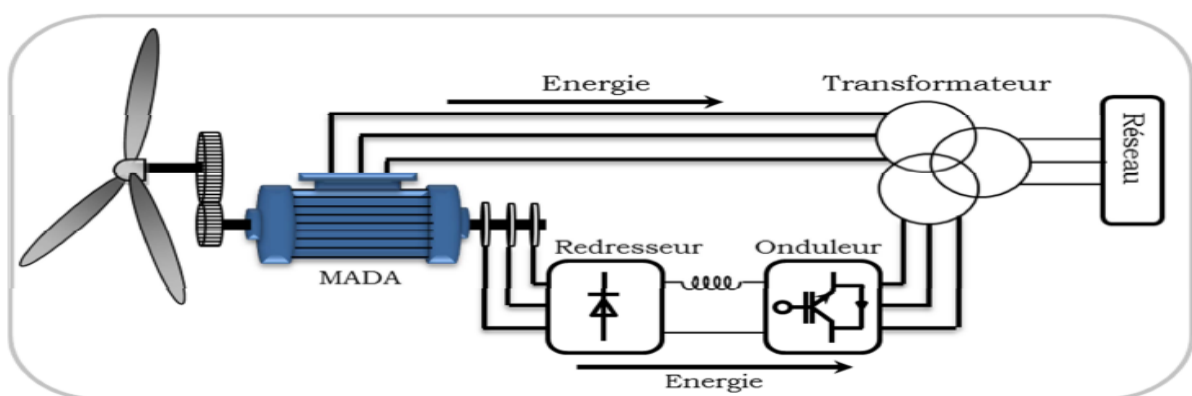


Figure (3.16): MADA - structure Kramer [90]

3.10.1.3. c. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Dans cette configuration le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO (Fig. 3.17). Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier

l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [94].

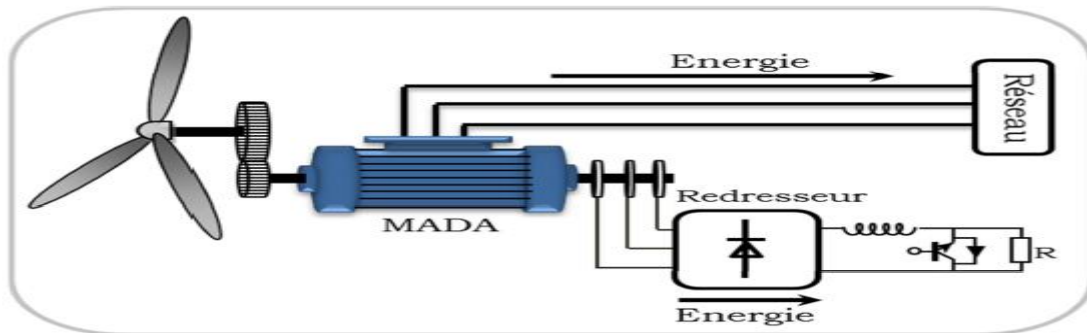


Figure (3.17): MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée [90]

3.10.1.3. d. Machine asynchrone à double alimentation – structure de « scherbius » avec cycloconvertisseur

Dans cette configuration la combinaison redresseur-onduleur est remplacée par un cycloconvertisseur (Fig. 3.18) pour permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé "structure de Scherbius". La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la (Fig. 3.17)[96].

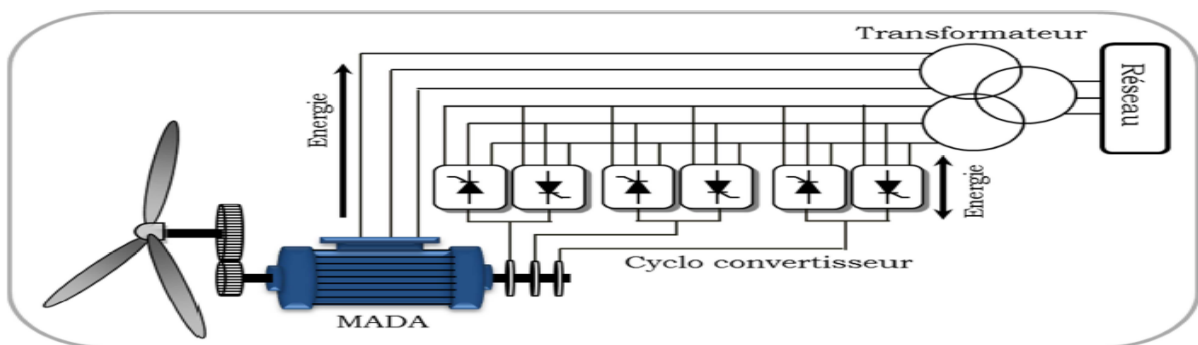


Figure (3.18): Structure de Scherbius avec Cyclo-convertisseur [97]

3.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

La génératrice synchrone n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un

convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur (Figure 3.19) : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite [98].

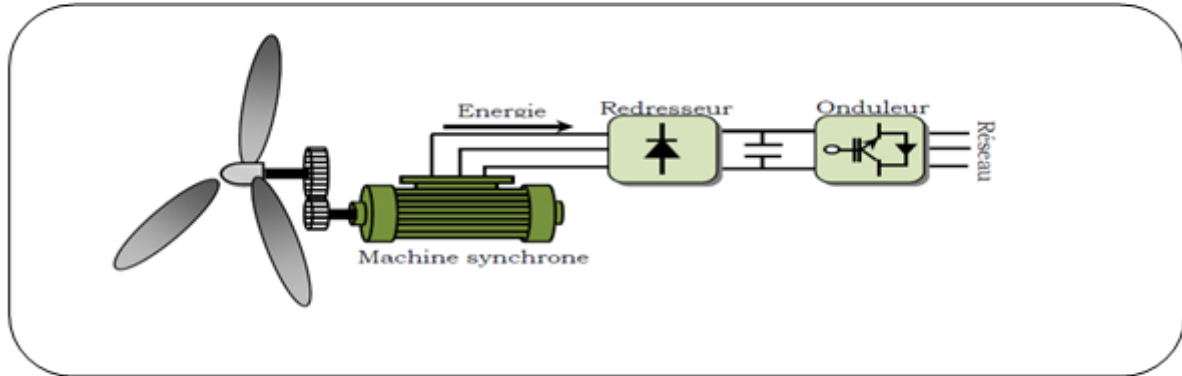


Figure (3.19): Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique [99]

3.10.2. 1. Machine synchrone à rotor bobiné

Ce genre de machines est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. On alimente ces bobines par des courants continus par l'intermédiaire des contacts glissants balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. On distingue deux types de machines synchrones à rotor bobiné :

- Les machines à pôles lisses
- Les machines à pôles saillants

La machine à pôles lisses a une inductance constante quelle que soit la position du rotor. Par contre, la machine à pôles saillants a un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance [100]. Les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure 3.20) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [101]. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.

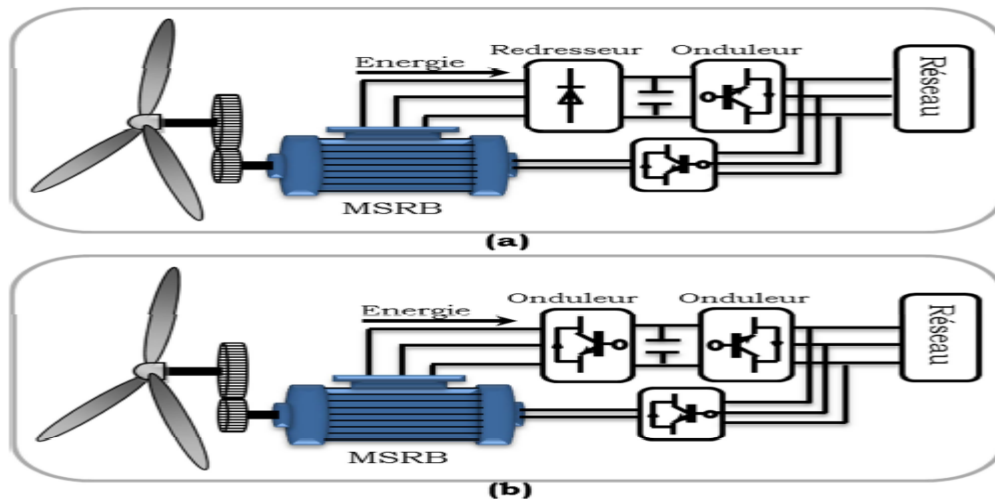


Figure (3.20): Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commandé [77]

3.10.2.2. Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

3.10.2. 2.a. Éolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) Connectée au réseau électrique

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs [102]. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [103], [104]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiés aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [105] [104], [103], [106]. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure. 3.21). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [107]. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [108].

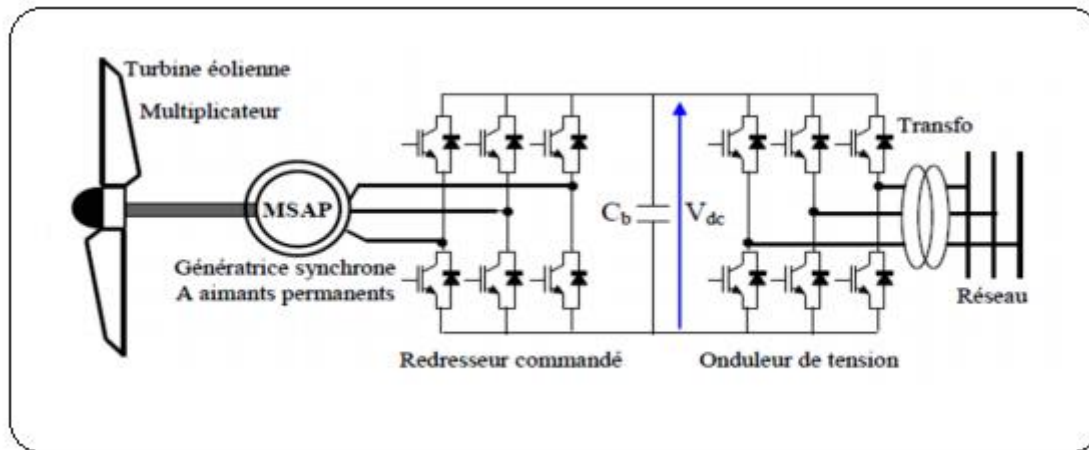


Figure (3.21): Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable [108]

3.10.2. 2.a. Les éoliennes à base de la génératrice synchrone à aimant permanent en fonctionnement isolé et autonome

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent [108].

A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances [109]. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la (figure 3.22). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée [110].

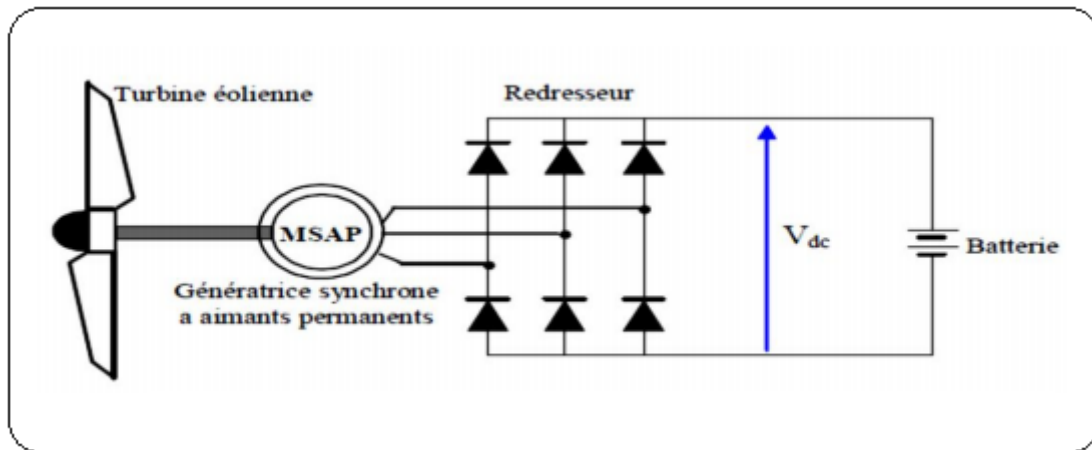


Figure (3.22): Machine synchrone avec redresseur à diodes [108]

B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure. 3.23) [110].

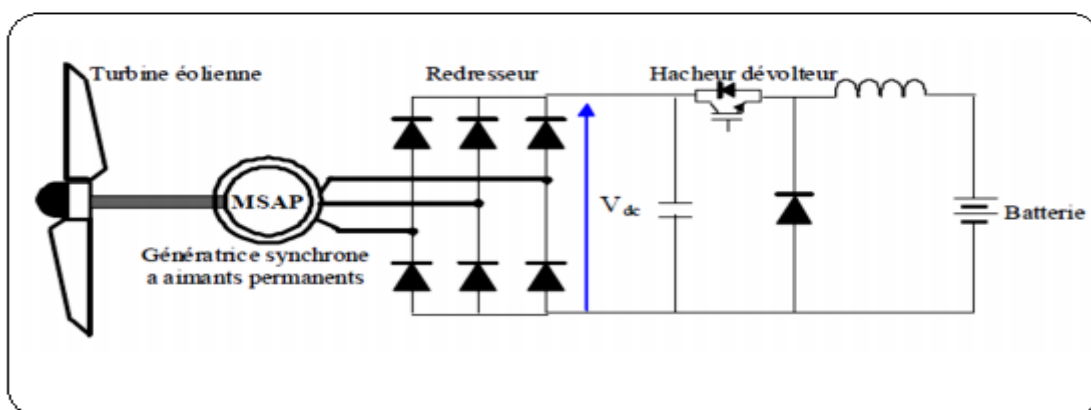


Figure (3.23): Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur [108]

C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T_1 et T_2 Figure (3.24). Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [110].

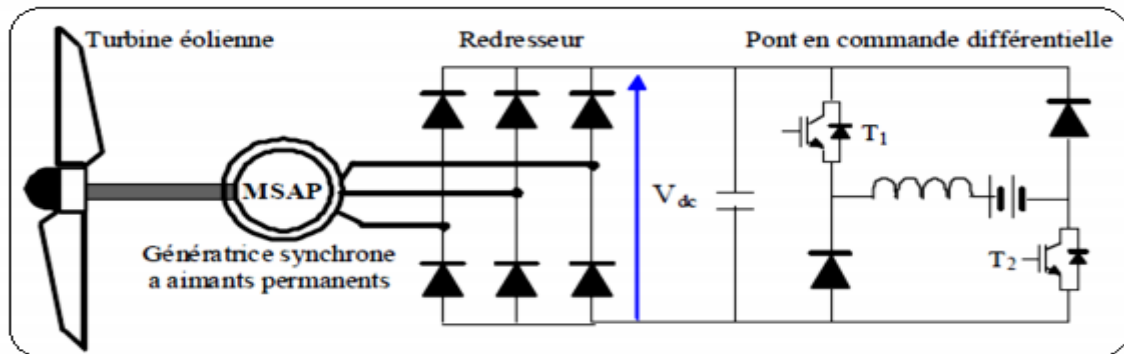


Figure (3.24): Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont [108]

D. Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (3.25), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [111]. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position [108].

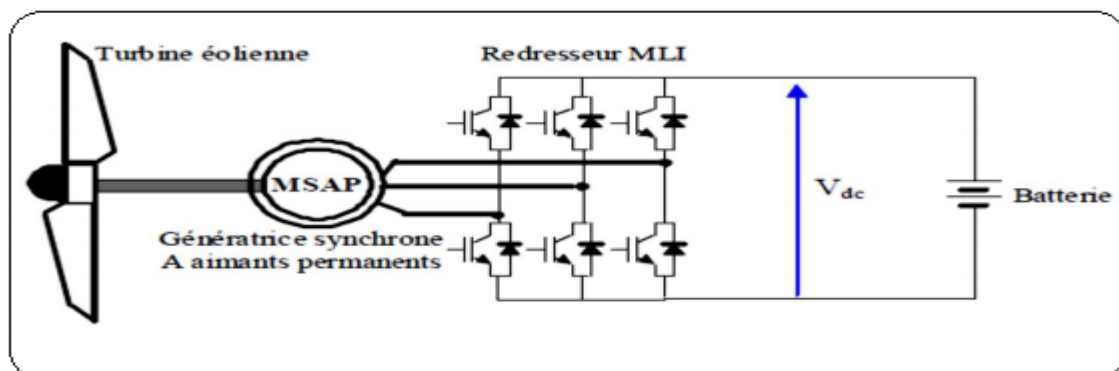


Figure (3.25): Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI [108]

3.10.3. Comparaison entre les différentes machines électriques :

Tableau (3.3) : Avantages et inconvénients de différentes machines électriques [112]

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS à vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> -Machine robuste. -Faible cout -Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> -Puissance extraite non optimisé. -Maintenance de la boîte de vitesse. -Pas de contrôle de l'énergie réactive. -Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> -Fonctionnement à vitesse variable. -Puissance extraite optimisé -Electronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale. -Machine standard. -Connexion de la machine facile à gérer. -Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> -Maintenance de la boîte de vitesse. -Pris de l'électronique de puissance. -Contrôle et commande complexe. -Contact glissant bagues -balais
MSAP à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> -Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse. -Puissance extraite optimisé pour les vents faibles. -Connexion de la machine facile à gérer. 	<ul style="list-style-type: none"> -Pris d'électronique de puissance. -Machine spécifique. -Grand diamètre de machine. -Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

3.11. Impact de l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique BT

La qualité de l'énergie est devenue un problème très important au cours de la dernière décennie. L'importance croissante tient à la généralisation rapide de l'utilisation d'équipements sensibles aux perturbations des systèmes électriques et à l'utilisation généralisée de convertisseurs électroniques de puissance à comportement non linéaire. L'ajout de turbines éoliennes peut avoir un effet significatif et aggraver la complexité de ce problème. Selon la configuration du réseau et le type d'éolienne utilisé, différents problèmes de qualité de l'énergie peuvent survenir [113]. La nature aléatoire des ressources éoliennes, le parc éolien génère une énergie électrique fluctuante. Ces fluctuations ont un impact négatif sur la stabilité et la qualité de l'énergie dans les systèmes d'énergie électrique. L'intégration d'appareils DG dans le réseau de distribution n'affecte pas seulement la planification du réseau, mais également son exploitation. Les aspects qui sont influencés par la connexion des unités DG sont

- la qualité de l'énergie
- le contrôle de la tension
- les pertes sur le réseau
- le niveau de défaut
- du système de protection.

L'augmentation du nombre de générateurs à induction entrants sur le réseau pose les problèmes de qualité d'alimentation principalement dans les cas suivants: Fluctuation de tension, Variation de la fréquence, Harmoniques et inter-harmoniques. Ces problèmes seront plus graves dans les réseaux faibles [114-115]. La commutation simultanée des générateurs à induction entraîne un appel excessif de puissance réactive du réseau, ce qui n'est pas souhaitable.

3.11.1. Fluctuation de tension

Le problème principal est le creux de tension dont l'origine est liée aux courts-circuits qui peuvent être provoqués par l'enclenchement de gros moteurs, d'appels de charges importantes, etc. Dans une moindre mesure, il y a des variations rapides de tension, provoquées par des variations rapides de puissance absorbées ou produites par des installations telles que les éoliennes. Ces fluctuations peuvent provoquer un papillotement de

l'éclairage gênant désigné par le terme flicker (ou papillotement). Les autres applications de l'électricité ne sont, normalement, pas affectées par ces phénomènes tant que la variation d'amplitude reste inférieure à 10% [116]. La chute de tension aux bornes de la ligne de connexion d'une éolienne au réseau peut être approximée par la relation suivante :

$$\Delta V = \frac{RP + QX}{V_{th}} \quad (3 - 14)$$

Où P et Q sont les puissances actives et réactives transitant par la ligne de résistance R et de réactance X.

3.11.2. Variation de la fréquence

La fréquence doit être maintenue autour de la valeur nominale de 50 Hz, quelles que soient les variations de consommation ou de production. En effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages. D'autre part, la plupart des composants du système électrique sont conçus pour fonctionner dans une plage de fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître. Avec l'augmentation des fermes éoliennes connectées sur le réseau HT, les variations de puissances pourraient causer des variations de fréquence [116].

3.11.3. Harmoniques et inter-harmoniques

Les éoliennes, interfacées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance, génèrent malheureusement des harmoniques. Les convertisseurs équipés en grande majorité de transistors IGBT, génèrent des harmoniques hautes fréquences (plusieurs kHz) mais, ces harmoniques peuvent être assez aisément limités contrairement aux convertisseurs équipés de thyristors générant des harmoniques de basse fréquence et nécessitant des filtres conséquents pour les éliminer [116].

3.12. Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne a base d'une MADA connecté au réseau BT

Pour modéliser la chaîne de conversion d'énergie éolienne, il est important de comprendre les dynamiques et les interactions entre les différentes composantes de cette chaîne. Cette dernière permet la transformation de l'énergie physique du vent en énergie mécanique grâce au rotor de la turbine avec pales et la boîte d'engrenage, pour ensuite convertir cette énergie

en une puissance électrique grâce à la génératrice. Cette énergie est transférée vers le réseau en passant par les convertisseurs statiques [117].

3.12.1 Description du système

Le système de conversion éolienne à vitesse variable basé sur une MADA, est illustré sur la figure (3.26). La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse (BDV). Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via un filtre triphasé de courant et deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), mis en cascade à travers un bus continu. L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le convertisseur côté rotor ou bien coté MADA « CCM » et le convertisseur côté réseau « CCR », transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA [117].

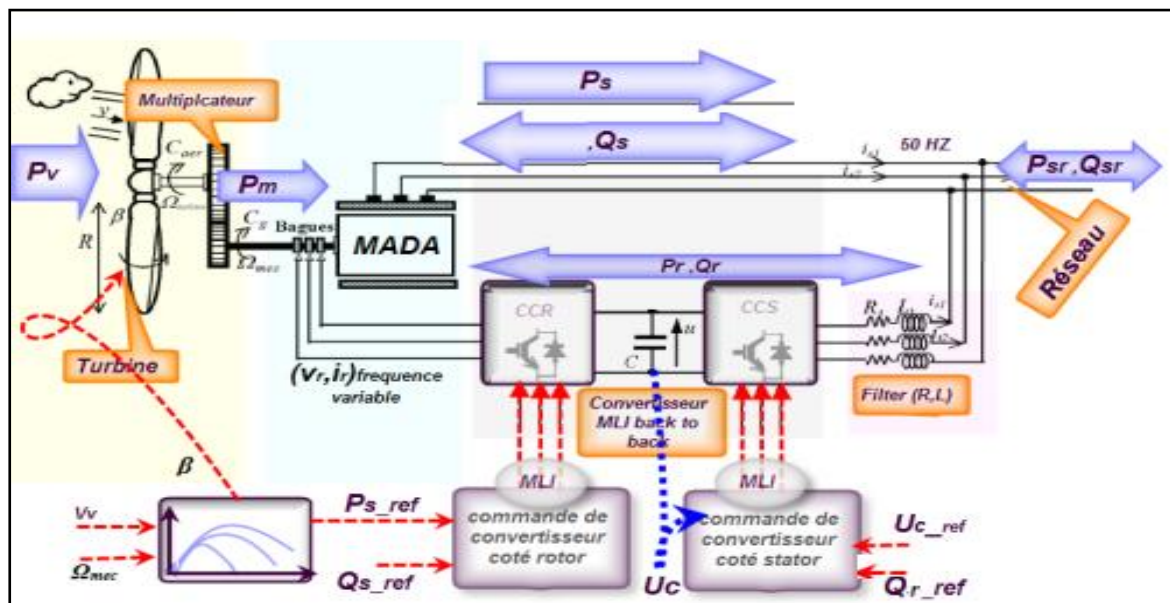


Figure (3.26) : Schéma synoptique pour le système de conversion d'énergie éolienne et sa commande [119]

3.12.2. Modèle du vent:

Le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique

une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [120].

La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V = 8,5 + 2 \sin(2,5t - \pi/5) + 2 \sin(4t - \pi/3) + 1,5 \sin(5,4t + \pi/12) + 0,5 \sin(2,5t - \pi/12). \quad (3 - 15)$$

La Figure (3.27) représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 12 m/s

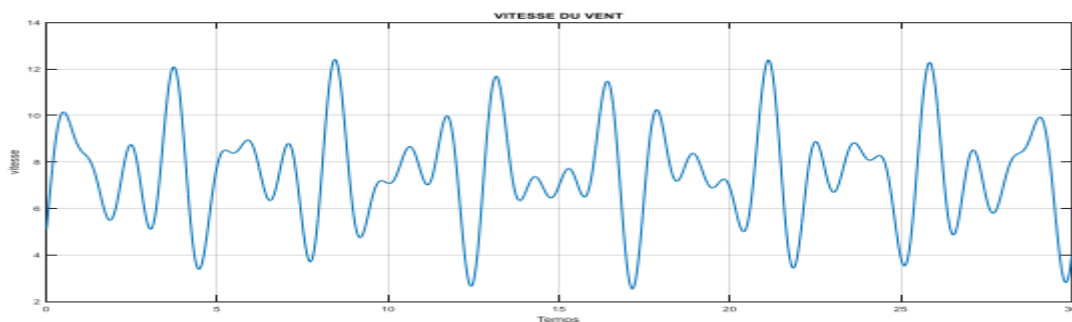


Figure (3.27) : Simulation de profil de vitesse du vent

3.12.3. Modélisation de la turbine

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.

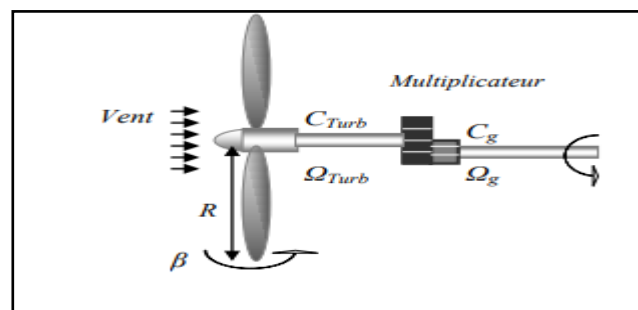


Figure (3.28) : Schéma de la turbine éolienne [119]

3.12.4. Modèle du multiplicateur :

Pour Adapter la vitesse (moyenne) de la turbine à la vitesse du générateur (MADA). Un multiplicateur est utilisé entre la turbine et le MADA, ce dernier est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [119] :

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad (3 - 16)$$

$$\Omega_T = \frac{\Omega_g}{G} \quad (3 - 17)$$

C_T, C_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

3.12.5. Modèle de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par l'équation suivante :

$$J_t \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{méc} \quad (3 - 18)$$

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3 - 19)$$

J_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f\Omega_{méc} \quad (3 - 20)$$

3.12.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La génératrice asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction quelques hypothèses acceptables afin d'obtenir un modèle mathématique simplifié sans compromettre sa pertinence [118].

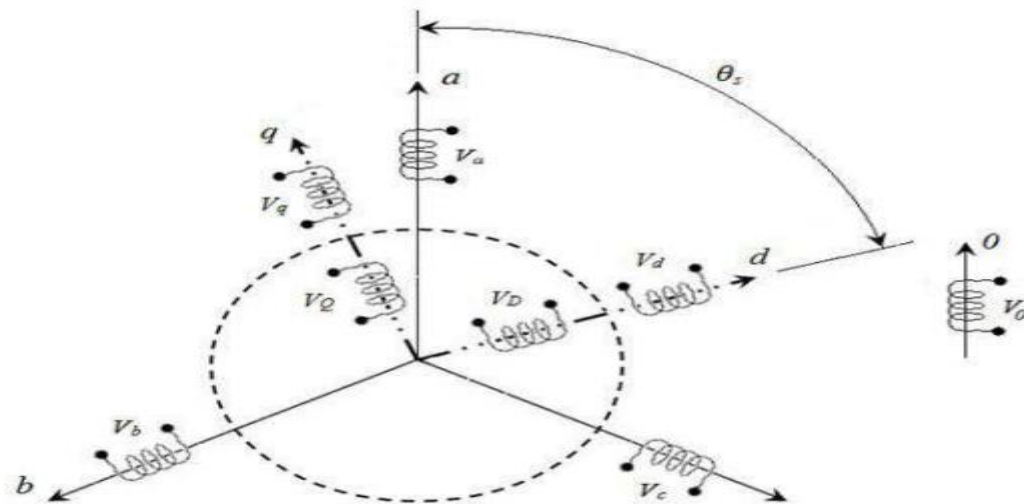


Figure (3.29) : Représentation de la MADA dans les deux repères (a, b, c) et (d, q) [118]

3.12.3.1. Hypothèses simplificatrices :

- Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :
- La géométrie de la machine est symétrique ;
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable ;
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires ;
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition sinusoïdale ;
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

3.12.6.1. Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA :

3.12.6.1.a. Equations électriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (3 - 21)$$

On a aussi :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où R_s et R_r sont respectivement la résistance des enroulements statoriques et rotoriques. Et les équations des flux sont données par:

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (3 - 22)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & L_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & L_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Où L_{ss}, L_{rr} : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques. ,
 M_r : sont les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$: est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M_{max} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{sr}]^t$ et $[M_{sr}]$: est l'inductance mutuelle stator-rotor

M_{max} : est la mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique. En remplaçant les flux par leurs expressions dans (3.21), on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (3 - 23)$$

3.12.6.1. b. Equations mécanique

L'équation mécanique de la machine est représentée par :

$$C_{em} = C_r + f_r \Omega + J \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (3 - 24)$$

Avec respectivement :

- C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine ;
- C_r : Le couple résistant ;
- f_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;
- J : L'inertie des parties tournantes. L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

3.12.7. Modèle de la MADA dans le plan (d, q)

3.12.7.1. La Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal. Elle est constituée d'une transformation triphasée- biphasée « du repère (a, b, c) au repère (α, β) », suivie d'une rotation « du repère (α, β) au repère (d, q) ». La matrice de transformation de Park est définie comme suit [118] :

$$P(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3 - 25)$$

3.12.7. 2. Application de la transformation de Park

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, on obtient les équations des flux (3.26), (3.27), et des tensions (3.28) et (3.29)

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (3 - 26)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (3 - 27)$$

- ✓ L_r et L_s : sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.
- ✓ M : l'inductance mutuelle.

φ_{sd} , φ_{sq} , φ_{rd} et φ_{rq} sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - W_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (3 - 28)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (W_e - W) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (W_e - W) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3 - 29)$$

Où $W_e = \frac{d\theta_e}{dt}$ et $W = \frac{d\theta}{dt}$: sont respectivement les pulsations électriques et mécanique.

Tel que : $\theta_e = \theta + \theta_r$

En choisissant le repère lié au champ tournant, on obtient les équations générales de la MADA :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3 - 30)$$

Avec respectivement : V_{sd} , V_{sq} , V_{rd} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé ;

W_s et W_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques. L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (3 - 31)$$

Avec P le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (3 - 32)$$

3.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

3.13.1. Avantages [121]

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ;
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ;
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple;
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

3.13.2. Inconvénients [122]

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau ;
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés ;
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe ;
- Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue.

3.14. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les différentes génératrices et convertisseurs utilisées, la description et l'impact sur le réseau et sur la qualité d'énergie dans les systèmes éoliens., nous avons aussi présenté la modélisation mathématique des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une MADA fonctionnant variable. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons par la suite, établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK., et enfin nous avons démontré les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Références bibliographiques

- [66] Bedoud, K., et al. "Modélisation Statistique pour l'Evaluation de l'Energie Eolienne." 3ème Conférence Internationale de Mécanique ICM'2017. 2017.
- [67] M. Jamil, R. Gupta, « A Review Of Power Converter Topology Used With PMSG Based Wind Power Generation », IEEE Fifth Power India Conference, (PIC 2012), pp. 01-06, 19-22 Décembre 2012, Murthal.
- [68] Derai, A., A. Kaabeche, and S. Diaf. "Etude de faisabilité technico-économique de fermes éoliennes en Algérie." *Revue des Energies Renouvelables* 20.4 (2017): 693-712.
- [69] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, X. Roboam, S. Astier, b. Dakyo, C. Nichita, « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », paru mai en 2002.
- [70] M. Jourieh, « développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien », Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [71] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>.
- [72] N.Laverdure, D. Roye, S.bacha, R.Belhomme, « Technologie Des Systèmes Eoliens-Intégration Dans Les Réseaux Electriques », *La Revue 3EI*, No.39, 2004.
- [73] N. Laverdure, « Sur L'intégration Des Générateurs Eoliens Dans Les Réseaux Faibles Ou Insulaires », Thèse De Doctorat En Génie Electrique, Institut National Polytechnique De Grenoble, France, 2005.
- [74] documentation GE Wind : www.gepower.com.
- [75] Rouabhi, Riyadh, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », Thèse de Doctorat. Université de Batna 2, 2016.
- [76] A.Boyette, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.

[77] Khaireddine, Allali, «Modélisation et analyse de l'intégration d'un jumelage Éolien-Diesel dans un réseau électrique autonome», Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.

[78] D.Mida, «Contribution à la modélisation d'un système de production d'énergie électrique hybride « Eolien – Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra, 2019.

[79] S. Elaimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrales dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.

[80] G.CUNTY, « Éoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.

[81] ALLAM, Mohamed, et al, «Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable», Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2017.

[82] KHETTACHE, Laid, «Contribution à l'Amélioration des Performances Des Systèmes Eoliens», Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.2019.

[83] Historiquedeséoliennes <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergisRenouvelables/index.htm>.

[84] Hau, Erich, and Wind-Turbines Fundamentals. "Technologies, Application." Economics, Springer (2000).

[85] Fateh, Louar, et al. "Modeling and control of a permanent magnet synchronous generator dedicated to standalone wind energy conversion system." *Frontiers in Energy* 10.2 (2016): 155-163.

[86] MULTON, Bernard, GERGAUD, Olivier, AHMED, Hamid Ben, et al. *Etat de l'art des aérogénérateurs*. 2002.

[87] MAKANGA KOUMBA, Paul, «.Contribution à l'étude et à la commande des éoliennes à génératrices synchrones dédiées aux réseaux électriques autonomes», Thèse de Doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières. 2019.

[88] O. Gergaud, « Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur », Thèse De Doctorat De L'école Normale Supérieure De Cachan, 2002.

[89] Boyette, Armand, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2006.

[90] Frédéric 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 de l'Université de Nantes 2003

[91] Hau, Erich. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics. Springer Science & Business Media, 2013.

[92] Eriksen, P., Ackermann, T., Abildgaard, H., Smith, P., Winter, W., And Rodriguez Garcia, J. (2005). System operation with high wind penetration. Power and energy magazine, IEEE, 3(6):65-74.

[93] Minh Huynh Quang, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de Doctorat, l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012.

[94] Guediri, Abdel Karim, « Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.

[95] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

[96] Lecocq, D, Lataire. P.H, "Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages", Controllable Proc. EPE, pp. 337-339, Firenze, 1991.

[97] WWEA, « Rapport mondial sur l'énergie éolienne 2008 », Fév. 2009, Allemagne.

[98]. L.Merad, B.Benyoucef Et Jean Pierre Charles, « Etude technico-economique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité (18) Afrique science 02(2) (2006) 187 – 197 Issn 1813-548x Mai 2006.

[99] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, «Robust output feedback control of a doubly fed induction machine», Proc. IEEE international symposium on industrial electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.

[100] Wu, Zhenwei, « Conception optimale d'un entraînement électrique pour la chaîne de traction d'un véhicule hybride électrique: Co-conception des machines électriques, des convertisseurs de puissance et du réducteur planétaire», Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 2012.

[101] Haritza Camblong , «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » , Thèse de Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[102] Techniques de l'Ingénieur, « Convertisseurs et machines électriques », D 3 960.

[103]Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, « PM Wind Generator Topologies », IEEE Transaction on industry application, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.

[104]J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, «A survey on variable-speed wind turbine system», Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.

[105]Makanga Koumba, Paul, « Contribution à l'étude et à la commande des éoliennes à génératrices synchrones dédiées aux réseaux électriques autonomes. », Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2019.

[106]F. Sahin, « Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine », Thèse de Doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001.

[107]A. Davigny , « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.

[108] M. Kassa Idjdarene, «Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes», Thèse de Doctorat, Université de Béjaia-Abderrahmane Mira, 2010.

[109] A. Schmidhofer, H. Weiss, «Optimisation of power electronics for small stand alone wind power stations », 10th European conference on power electronics and applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.

[110] A. Mirecki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.

[111] L. Leclercq, «Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.

[112] A. Davigny, «Participation aux services système de fermes d'éoliennes a vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2008.

[113] Stefan Marko, Ivan Darul'a, «Large scale integration of renewable electricity production into the grids», Journal of Electrical Engg, vol. 58, no.1 pp.58–60, 2007.

[114] Inigo Martinez de Alegriaa, Jon Andreua, Jose Luis Martna, Pedro Iban ezb, Jose Luis Villateb, Haritza Camblongc, «Connection requirements for wind farms: A survey on technical requierements and regulation», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.11, no.6,pp.1858–1872,2007.

[115] S.K. Khadem,M. Basu,M.F.Conlon, «Power quality in grid connected renewable energy systems: role of custom power devices» ,International conference on renewable energies and power quality,Spain,vol.III,pp.23-25 March 2010.

[116] B. Beltran, «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, France, juillet 2010.

[117] GAILLARD, Arnaud, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service», Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.

[118] AYOUB, Tarik, «Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation, » Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 2013.

[119] A.tamaarat, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de MADA», Thèse de Doctorat, Université de Mohammed khider-Biskra, 2015.

[120]AZZOUZ, « Tamaarat. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA», Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra. 2015.

[121] C. Bourillon, «Wind energy – Clean power for generations», Renewable energy, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.

[122] MAZOUZ, Lakhdar, «Etude et analyse d'un système HVDC-VSC connecté à une ferme d'énergie éolienne», Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbes, 2018.

Chapitre 04 :
Techniques d'optimisation des systèmes hybrides PV-
éolien



« Je crois en une vie après la mort, tout simplement parce que l'énergie ne peut pas mourir ; Elle circule, se transforme et ne s'arrête jamais »

Albert Einstein

4. 1.Introduction	101
4.2. Définition	101
4.3. Différentes types des systèmes hybrides	102
4.3.1. Selon le régime du fonctionnement	102
4.3.1. 1.Système d'énergie hybride autonome	102
4.3.1. 2.Système d'énergie hybride connectés au réseau	102
4.3.2. Selon la gamme de la puissance	103
4.4. Configuration du bus dans les systèmes hybrides	103
4.4.1. Architecture à bus continu	103
4.4.2. Architecture à bus alternatif	104
4.5. Différentes configurations des systèmes hybrides photovoltaïque/eolienne	105
4.5.1. Système hybride photovoltaïque/éolienne connecté au réseau	105
4.5.2. Système hybrides autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage	105
4.6. Commande et stratégie de fonctionnement d'un système hybride	106
4.6.1. Commandes mppt des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque	106
4.6.1. 1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	107
4.6.1. 2. Méthode de la conductance incrémentielle	109
4.6.1. 3. Méthode de la dérivée de la puissance	110
4.6.2. Commandes MPPT des systèmes de conversion d'énergie éolienne	116
4.6.2. 1. Contrôle de la vitesse spécifique (TSR)	117
4.6.2. 2. Algorithme basé sur la relation optimale (ORB)	118
4.6.2. 3. Algorithme hill climb	118
4.6.2. 4. MPPT hybride	118
4.6.2. 5. MPPT intelligentes	119
4.7. Avantages et inconvénients d'un système hybride	120
4.8. Conclusion	121

4. 1.Introduction

Dans la plupart des régions éloignées, le groupe électrogène diesel est la principale source d'énergie électrique. Le prix du carburant qui augmente avec la distance et la baisse continue des prix des générateurs basés sur les énergies renouvelables ont conduit à un couplage entre plusieurs sources, par exemple les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs. Les systèmes d'énergie hybride combinent deux ou plusieurs technologies complémentaires: une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles, généralement des générateurs, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelables comme l'énergie éolienne et photovoltaïque ne fournissent pas une puissance constante. Leur association avec des sources conventionnelles permet d'obtenir une production électrique continue. L'objectif d'un système hybride est de fournir l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. Les performances d'un système hybride, son efficacité et sa durée de vie dépendent en partie de sa conception, c'est-à-dire du dimensionnement des composants, du type de composants, de l'architecture, etc., ainsi que du choix de la stratégie d'exploitation. Certains paramètres pour évaluer ses performances sont: économie de carburant, coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour maintenance, etc. [123].

4.2. Définition

Le terme "système d'énergie hybride" désigne des systèmes de production d'énergie à sources multiples. Ce sont des systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou associés à des sources conventionnelles (groupe électrogène diesel ...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils compensent la nature intermittente des sources renouvelables et offrent une efficacité énergétique globale plus élevée. Leur principal intérêt est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils autorisent car ils ne dépendent pas d'une source unique. Ils peuvent résoudre en grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie [124]. La figure (4.1) montre le schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments connectés. Ces derniers sont regroupés en fonction de leur fonction électrique: les éléments de génération (ou sources), les éléments de charge (Load en anglais) et les éléments de stockage (Storage en anglais, en pointillé sur la figure).

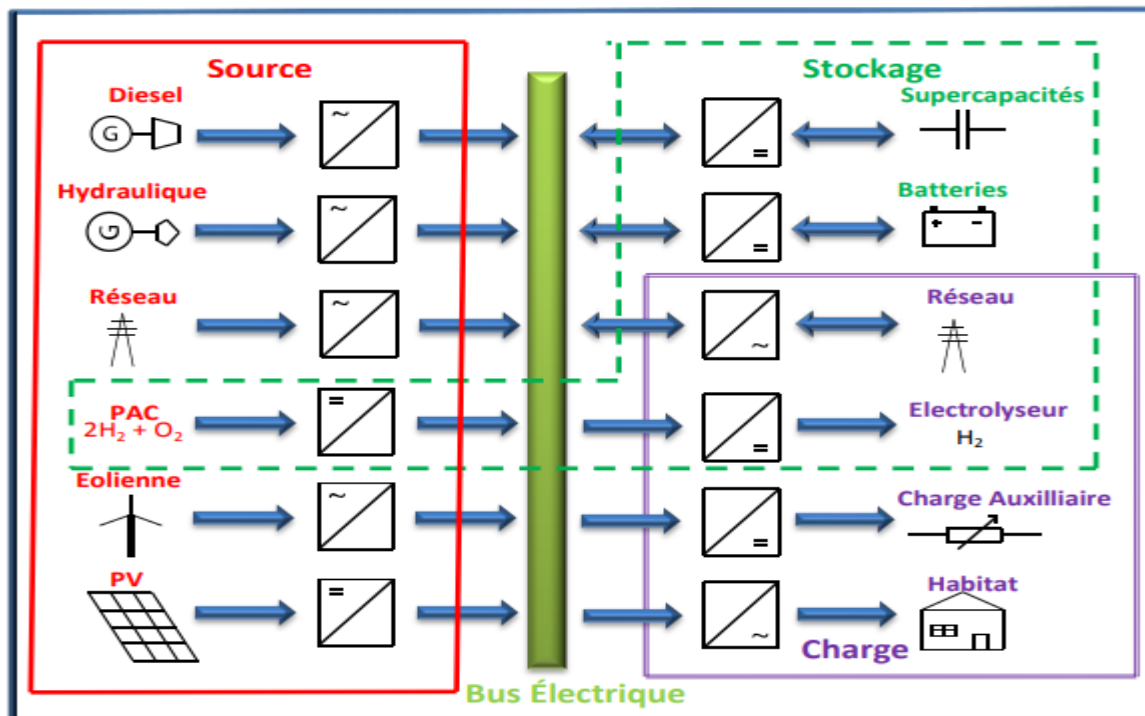


Figure (4.1): Schéma général de système hybride multi-sources, charges et stockage [125]

4.3. Différents types des systèmes hybrides

4.3.1. Selon le régime du fonctionnement :

Selon le régime de fonctionnement, les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux grandes familles :

4.3.1. 1. Système d'énergie hybride autonome :

Autonomes car ils génèrent de l'énergie sans connexion ou sans besoin d'assistance du réseau électrique. Souvent utilisé pour répondre aux besoins de sites difficiles d'accès ou n'ayant pas accès à un réseau électrique (par exemple: cabanes de montagne, îles, villages isolés ...) [126].

4.3.1. 2. Système d'énergies hybrides connectées au réseau :

L'interface entre le SEH et le réseau électrique peut être constituée par le convertisseur statique « l'onduleur » assurant la conversion du courant continu / alternatif. L'énergie produite par le SEH est consommée immédiatement. En effet, le surplus d'énergie est injecté dans le réseau, qui agit en tant que système de stockage d'énergie. Par conséquent, pour ce type de système, l'utilisation d'un système de stockage n'est pas nécessaire car en cas

d'incapacité du SEH à assurer la demande de la charge, le réseau intervient pour assurer l'énergie nécessaire [126].

4.3.2. Selon la Gamme de la puissance :

La puissance fournie par SEH peut varier de quelques watts à quelques mégawatts. Les systèmes hybrides utilisés pour les applications à faible consommation d'énergie (<5 kW) alimentent généralement les petites maisons. D'autre part, les systèmes plus importants (puissance > 500 kW) sont conçus pour être connectés à de grands réseaux. Le champ d'application de SEH reste très large [126]. Néanmoins, une classification peut être faite en fonction de la plage de puissance présentée dans le tableau 4.1

Tableau (4.1): Classification des SEH par gamme de puissance [127]

Gamme de puissance	Utilisation
Faible : inférieur à 5 kW	Système autonome : petite maison, pompage d'eau
Moyenne : entre 10 à 250 kW	Alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande : supérieure à 500 kW	Grands réseaux isolés.

4.4. Configuration du bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un Système Hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou mixte. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitués de sources d'énergie renouvelable, avec ou sans stockage [128].

4.4.1. Architecture à bus continu :

Dans le système hybride présenté dans la figure (4.2), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu. Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu [129].

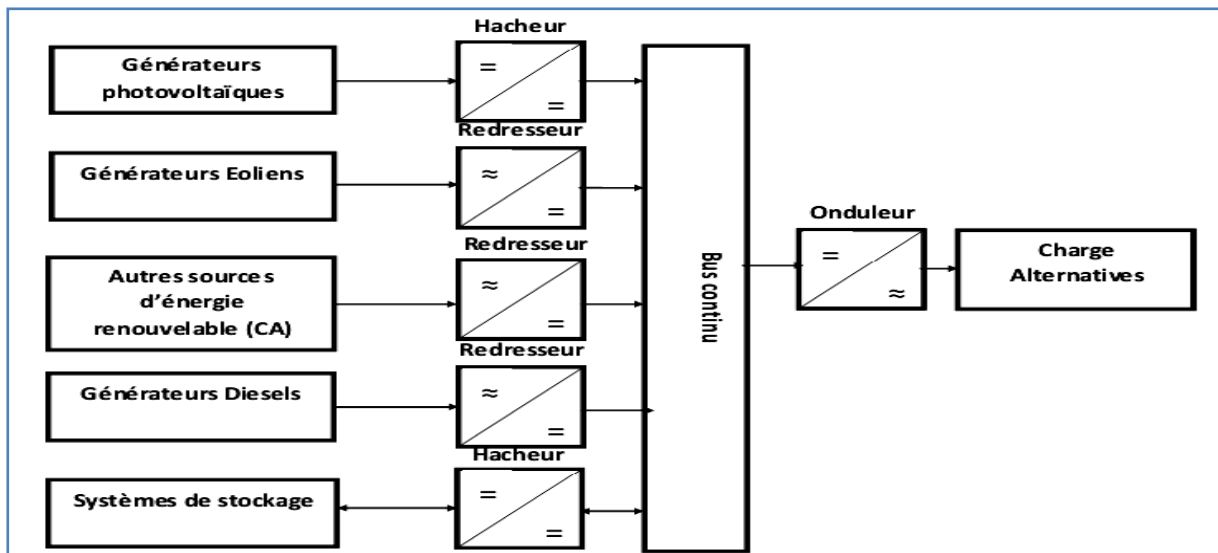


Figure (4.2): Configuration du système hybride à bus continu [129]

4.4.2. Architecture à bus alternatif :

Cette configuration présente des performances supérieures à celles de la configuration précédente, car chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur afin de pouvoir alimenter la charge de manière indépendante et simultanément avec d'autres convertisseurs figure (4.3). Cela offre une flexibilité aux sources d'alimentation pouvant satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement en parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [130].

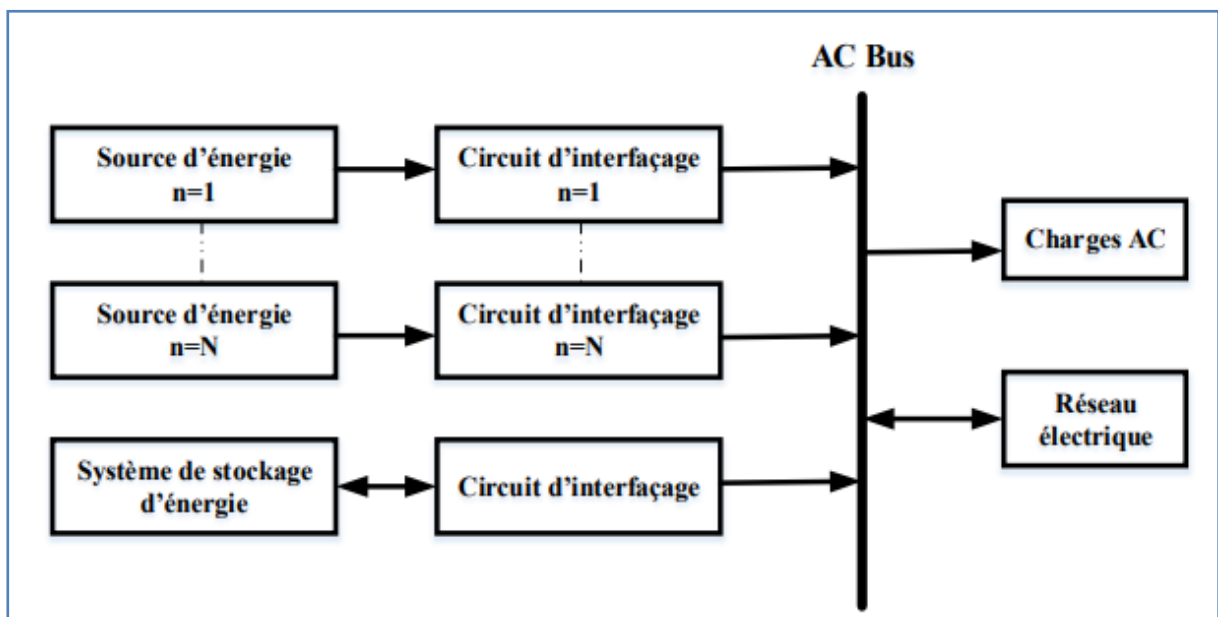


Figure (4.3): Configuration du système hybride à bus alternatif [130]

4.5. Différentes configurations des systèmes hybrides photovoltaïque/éolienne

4.5.1. Système hybride photovoltaïque/éolienne connecté au réseau

Le système se compose de modules photovoltaïques, éoliennes, batteries, des convertisseurs CC/CA et CA/CC qui sont en mesure de répondre à la demande de pointe de consommation de la charge ou d'injecter la production dans le réseau de distribution. Il est composé aussi d'onduleur bidirectionnel pour alimenter les batteries à la tension appropriée. Ici, les sources solaires et éoliennes sont les principales sources d'énergie, et la batterie se charge lorsque la puissance générée est excédentaire. Et lorsque la demande de puissance est plus que la production instantanée, la batterie se décharge pour répondre à la demande de la charge. Un schéma de base d'un système de production hybride photovoltaïque/éolienne avec batterie de stockage est présenté dans la Figure (4.4) [131].

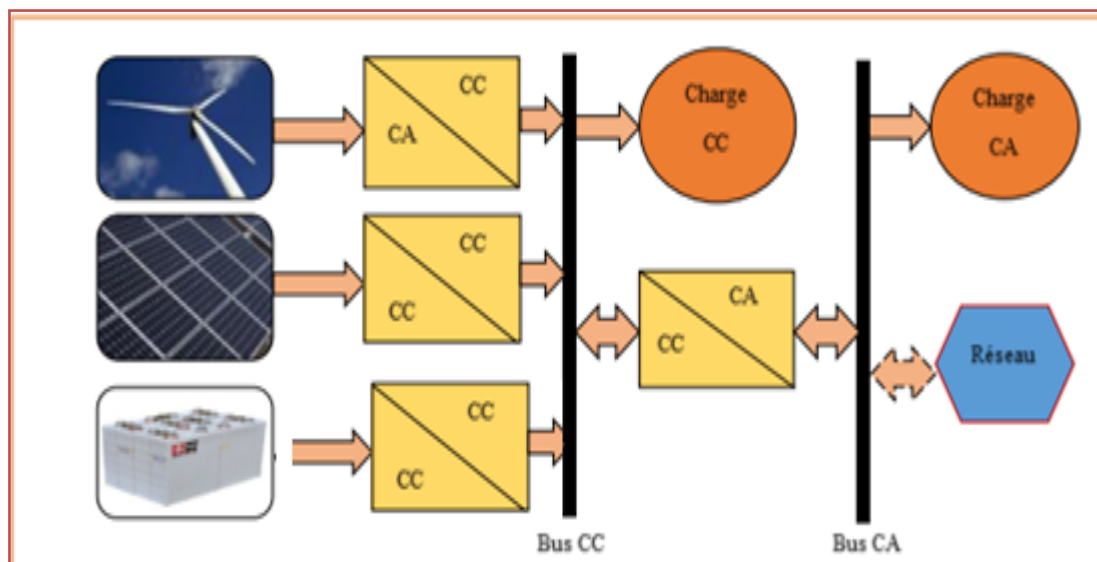


Figure (4.4): Configuration d'un système photovoltaïque/éolien [131]

4.5.2. Système hybride hybrides autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage

La figure (4.5) donne un exemple typique de centrale hybride non connectée au réseau associant deux sources d'énergie éolienne et solaire et un stockage d'énergie. Le "nœud électrique" connecte et distribue l'énergie entre les divers composants du système. Avec cette combinaison, nous obtenons un réseau électrique à courant continu et / ou courant alternatif totalement autonome. Nous parlons ainsi un réseau mini-local « iloté », avec une faible puissance de court-circuit. Dans la plupart des références bibliographiques [132], il existe une corrélation bien établie entre le "mini" réseau "iloté" et le système multi-sources.

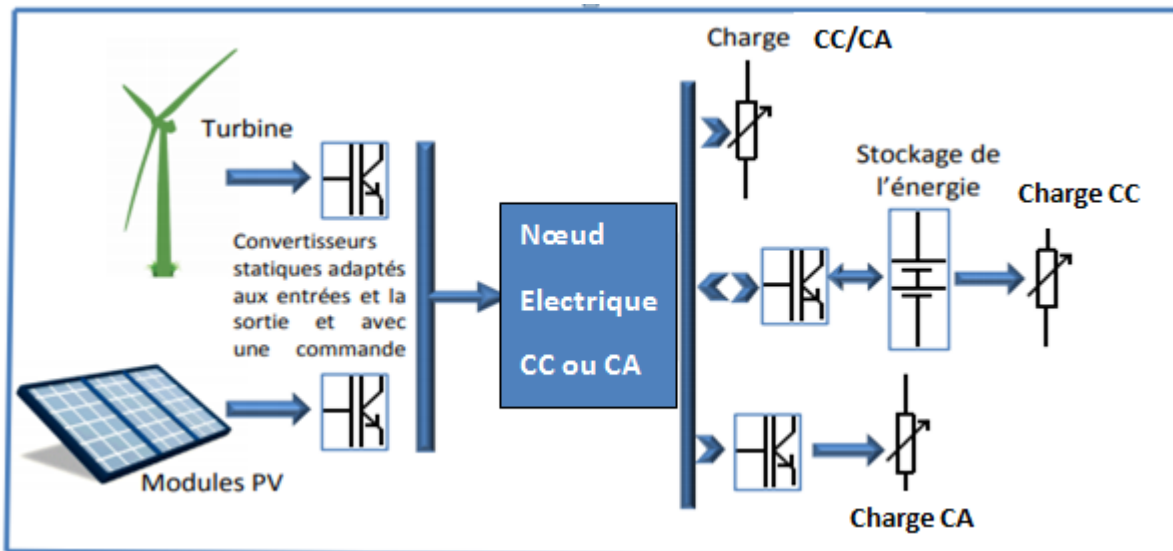


Figure (4.5): Configuration hybride générale dédiée à un site isolé couplage éolien photovoltaïque [132]

4.6. Commande et stratégie de fonctionnement d'un système hybride

L'optimisation de la capacité d'un système de génération hybride devient très compliquée, dans le cadre de la minimisation de la fonction objective, en raison de l'incertitude dans les énergies renouvelables ainsi que la demande de charge et la non-linéarité des composants du système. La gestion optimale des ressources dans un système de génération hybride est cruciale pour atteindre un coût acceptable et un niveau de fiabilité. Le surdimensionnement des composants du système augmentera le coût du système, tandis que, le sous dimensionnement peut entraîner une défaillance de l'alimentation [133]. Ainsi, les soins suffisants doivent être pris pour concevoir un système fiable à un coût minimal [134]. Les unités de production PV et éoliennes sont les technologies les plus prometteuses pour alimenter la charge dans les régions éloignées, rurales et même connectées au réseau électrique. Un inconvénient majeur de ces unités est la nature imprévisible des sources d'énergie solaire et éolienne. En outre, les variations de ces sources ne peuvent pas correspondre avec le temps de distribution de la demande. Ces inconvénients se traduisent par des sérieux problèmes de fiabilité dans la conception et le fonctionnement des systèmes PV et éolienne. D'autre part, le dimensionnement est une approche pour surmonter les problèmes de fiabilité. Cependant, il peut être coûteux [135].

4.6.1. Commandes MPPT des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un convertisseur CC/CC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque

de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelque soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande place ainsi le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt} , I_{opt}) figure (4.6). Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum, [136], [137]. A savoir plusieurs méthodes d'optimisation :

- **Méthode de perturbation et d'observation (P&O) ;**
- **Méthode de conductance incrémentielle ;**
- **Méthode de la dérivée de la puissance ;**

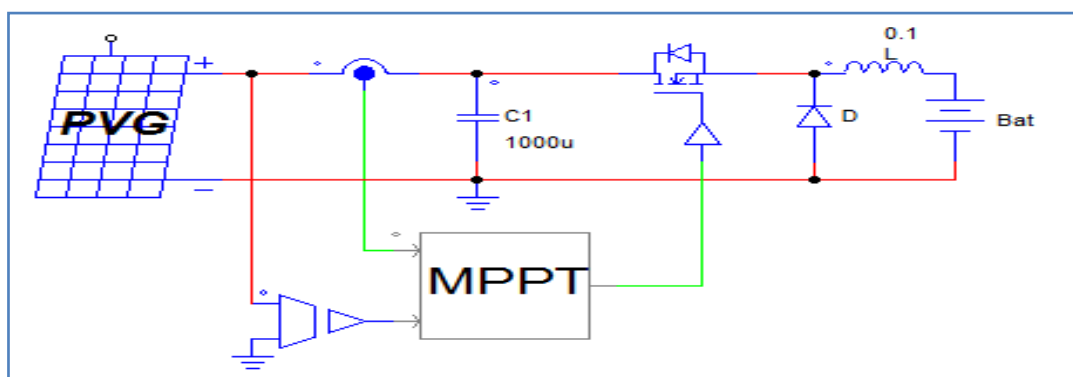


Figure (4.6) : Système photovoltaïque avec contrôleur MPPT

4.6.1. 1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [136], [138], comme montré sur la figure (4.7).

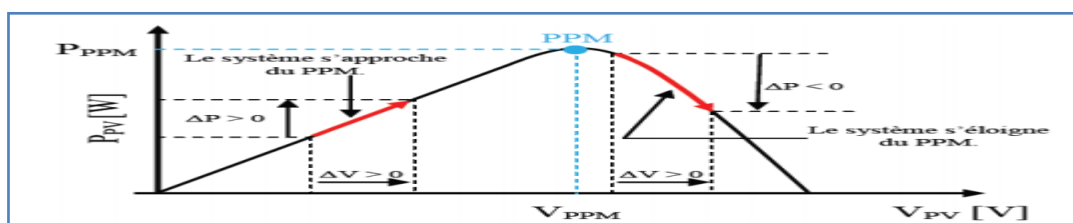


Figure (4.7): Caractéristique $P(V)$ d'un panneau Photovoltaïque

Le point fort de cette méthode est que la connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée aussi c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie [139]. La figure (4.8) illustre l'organigramme de cette technique. Le logiciel Psim a été utilisé pour simuler cette technique comme le montre la figure (4.9) [140].

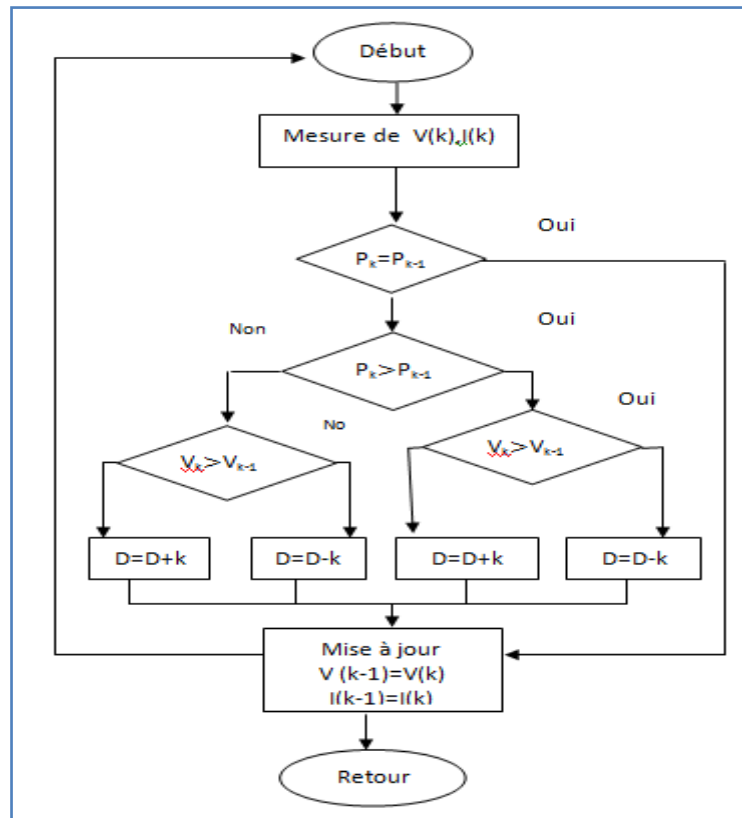


Figure (4.8): organigramme de la Technique P&O

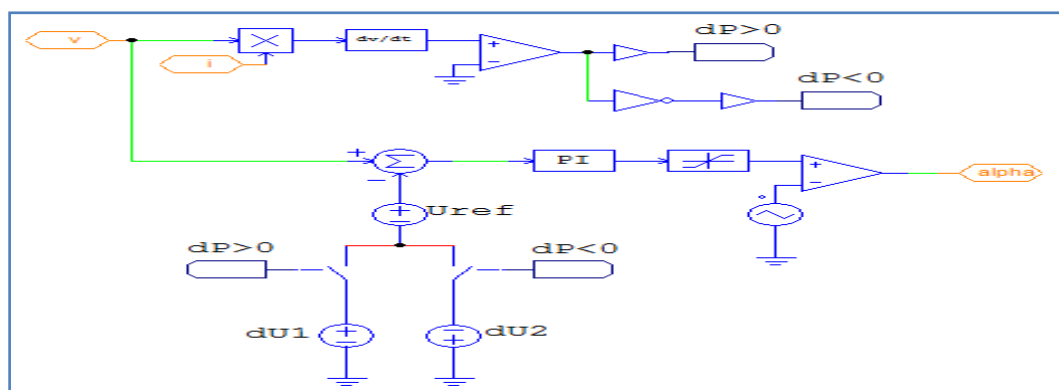


Figure (4.9): Implémentation de la technique P&O sous Psim

4.6.1. 2. Méthode de la conductance incrémentielle

L'algorithme de conductance incrémentale est largement utilisé en raison de la grande précision de suivi en régime permanent et de sa bonne adaptabilité aux conditions atmosphériques en évolution rapide [140]. La conductance incrémentale a été conçue sur la base de l'observation de la courbe caractéristique P-V. Cet algorithme a été développé en 1993 et était destiné à surmonter certains des inconvénients de l'algorithme P&O. IC essaie d'améliorer le temps de suivi et de produire plus d'énergie sur un large environnement d'irradiation [141]. Le MPP peut être calculé en utilisant la relation entre dI / dV et $-I / V$. Si dP / dV est négatif, alors MPPT est situé du côté droit de la position récente et si le MPP est positif, le MPPT est du côté gauche [142]. L'équation de l'algorithme IC est :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} \quad (4 - 1)$$

MPP est atteint lorsque ($dP / dV = 0$) et

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (4 - 2)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ then } V_p < V_{MPP} \quad (4 - 3)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ then } V_p = V_{MPP} \quad (4 - 4)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ then } V_p > V_{MPP} \quad (4 - 5)$$

Si MPP est sur le côté droit, $dI / dV < -I / V$, la tension PV doit être diminuée pour atteindre le MPP [143]. La technique IC peut être utilisée pour atteindre le MPP, améliorer l'efficacité PV, diminuer la perte de puissance et coût du système [142]. Par rapport à la technique P&O, l'implémentation IC sur un microcontrôleur produit des performances plus stables [144]. L'oscillation autour de la zone MPP peut également être supprimée dans le compromis avec sa complexité de mise en œuvre. La figure (4.10) montre l'organigramme de l'algorithme de conductance incrémentale. La figure (4.11) illustre la mise en œuvre de la technique IC MPPT dans un environnement psim.

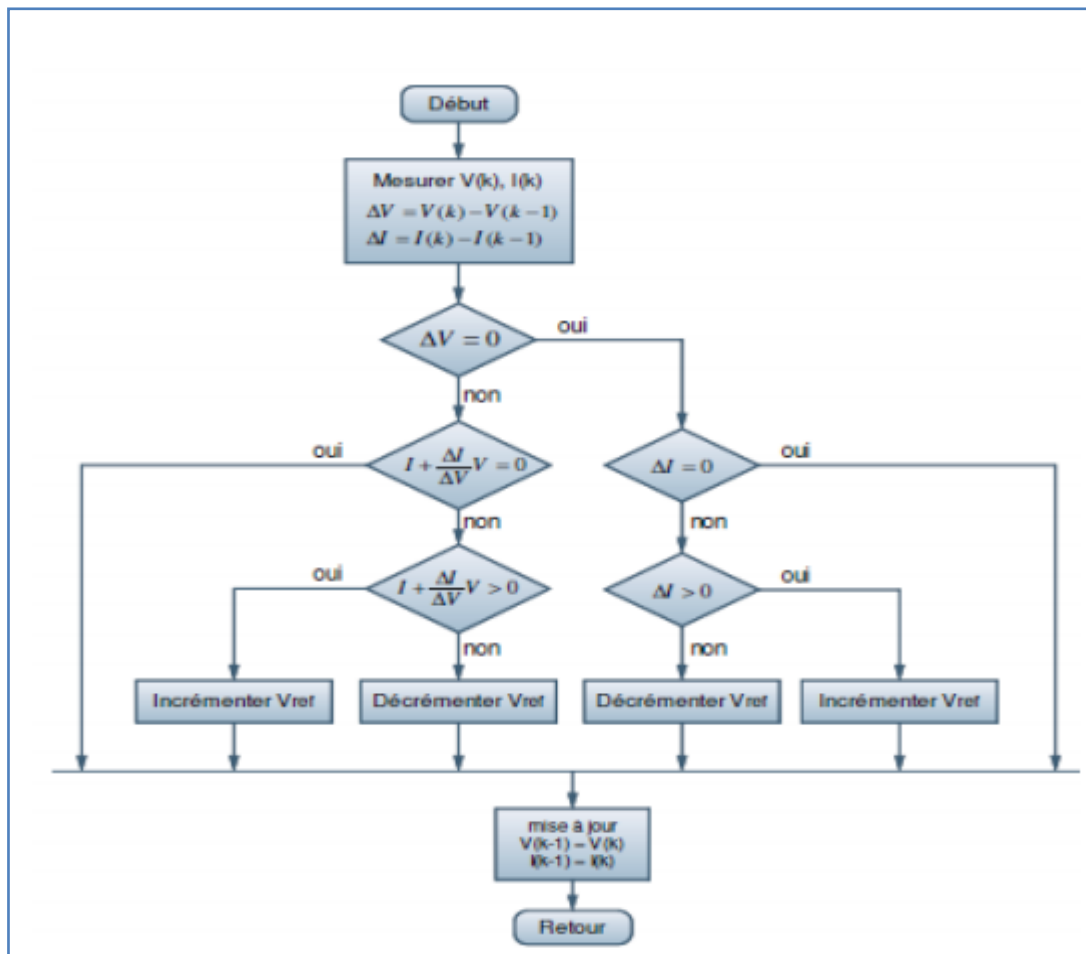


Figure (4.10): Organigramme de l'algorithme de conductance incrémentale.

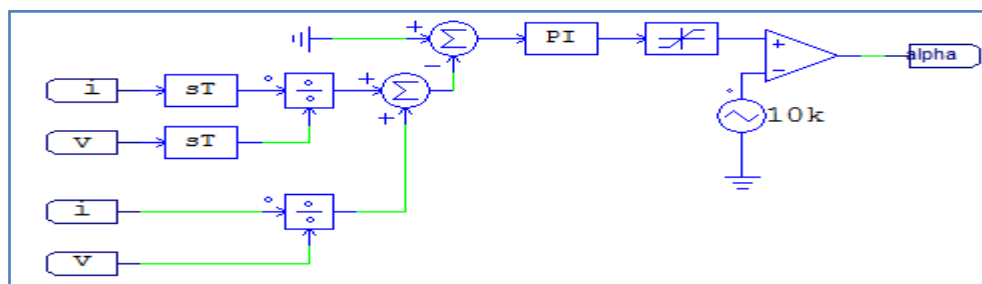


Figure (4.11): Implémentation de l'algorithme de conductance incrémentale sous Psim

4.6.1. 3. Méthode de la dérivée de la puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P_{pv} = (V_{pv})$ obtenue directement de la caractéristique du (GPV). Le (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $(P_{pv} / dV_{pv} = 0)$ Lorsque $(dP / dV) = 0$, c'est le point de puissance maximale. Les équations de la méthode de la dérivée de la puissance(DP) sont:

$$dP / dV = 0 \quad (4 - 6)$$

$$(d(V * I)) / dV = 0 \quad (4 - 7)$$

$$V * dI / dV + I = 0 \quad (4 - 8)$$

On a

$$V * dI = -I * dV \quad (4 - 9)$$

Le point de puissance maximale (PPM) est donné par la Figure (4.12) :

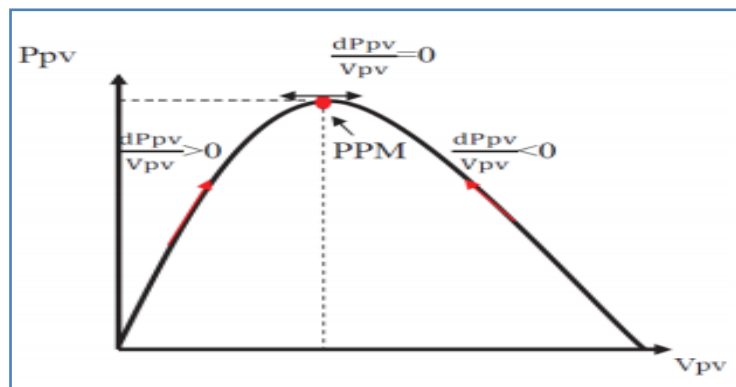


Figure (4.12): Caractéristique du point de puissance maximale PPM

Psim a été utilisé pour simuler cette technique, comme l'illustre la figure (4.13).

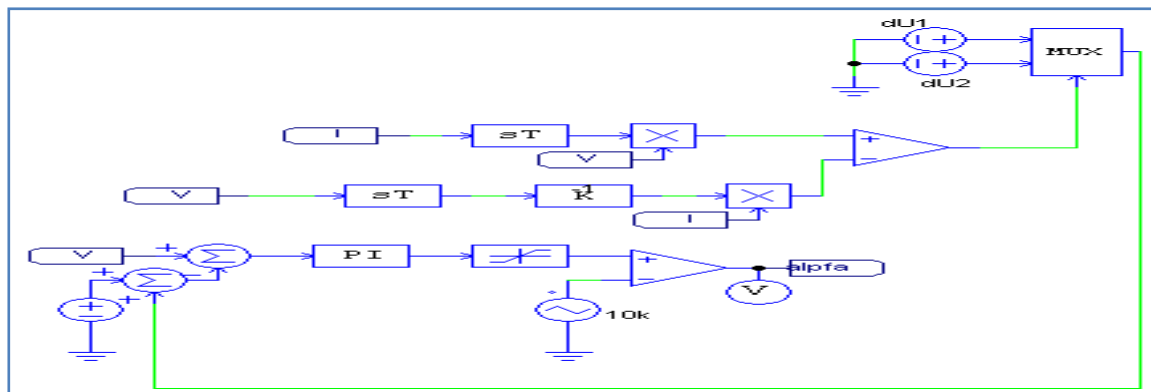


Figure (4.13) : Implémentation de la Méthode de la dérivée de la puissance sous Psim

4.6.2. Résultats de simulation

Les trois méthodes précédentes sont mises en œuvre dans l'environnement PSim. Après avoir exécuté divers programmes, les résultats sont les suivants:

4.6.2.1. Résultats de la méthode P&O:

Les formes d'onde de l'irradiation, des courants, des tensions, de la puissance extraite, de la puissance théorique maximale et de l'efficacité moyenne du système utilisant la technique P&O sont représentées sur les figures (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) et (4.18) respectivement.

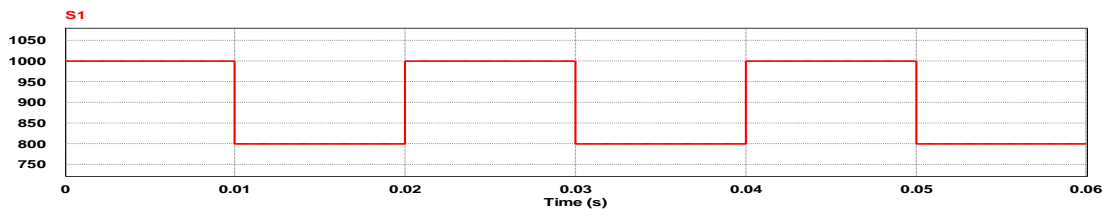


Figure (4.14) : Profil d'éclairement ($S1$)

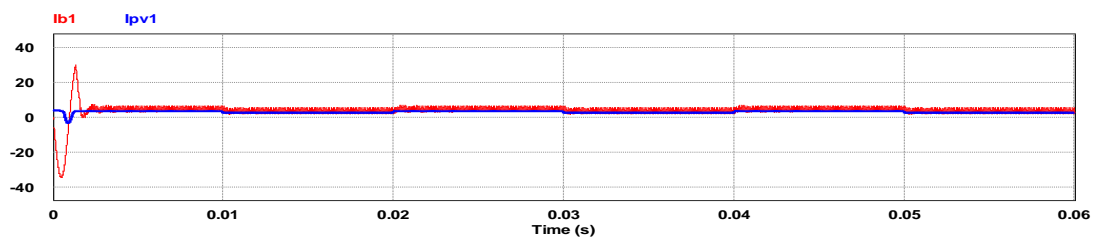


Figure (4.15) : Le courant consommé par la batterie (I_{b1}) et le courant généré par le module PV (I_{PV1})

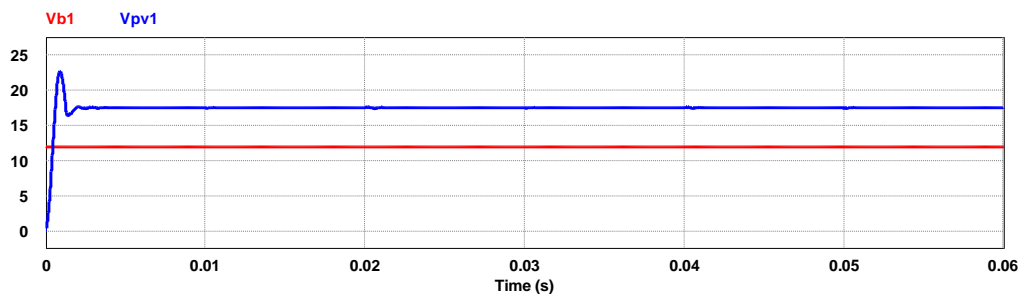


Figure (4.16) : La tension de la batterie (V_{b1}) et la tension du module PV (V_{PV1})

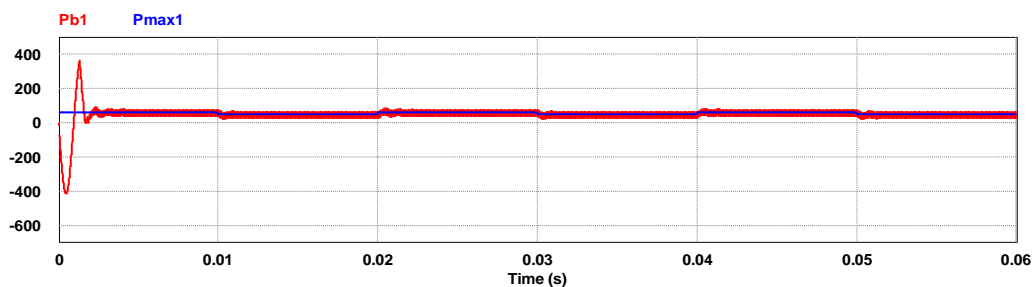


Figure (4.17) : La puissance extraite (P_{b1}) et la puissance maximale théorique extraite (P_{max1})

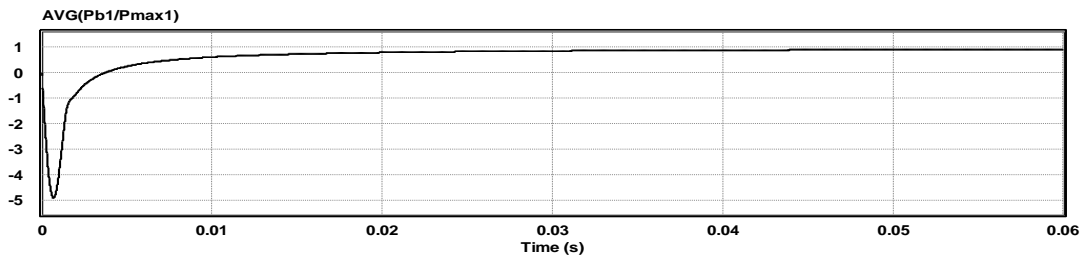


Figure (4.18) : L'efficacité moyenne obtenue avec la technique P&O

4.6.2.2. Résultats de la méthode IC

Les figures (4.19), (4.20), (4.21), (4. 22) et (4.23) présentent les formes d'onde d'irradiation, les courants, les tensions, la puissance extraite, la puissance théorique maximale et le système d'efficacité moyenne obtenu avec la technique IC.

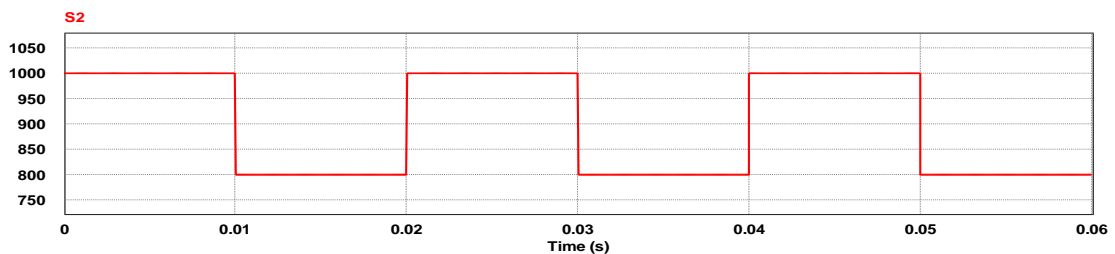


Figure (4.19) : Profil d'éclairement (S2)

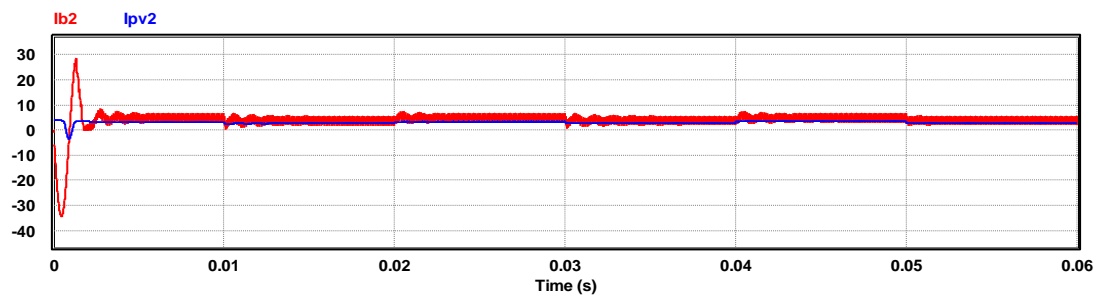


Figure (4.20): Le courant consommé par la batterie (I_{b2}) et le courant généré par le module PV (I_{PV2})

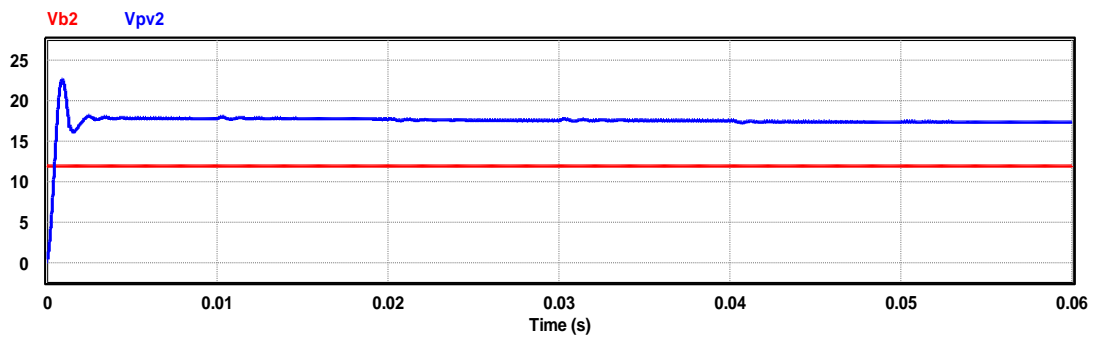


Figure (4.21): La tension de la batterie (V_{b2}) et la tension du module PV (V_{PV2})

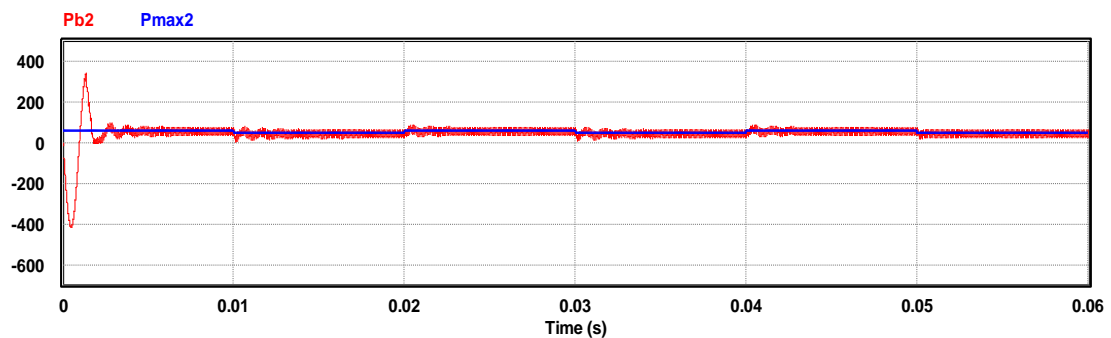


Figure (4.22): Puissance extraite (P_{b2}) et théorique de la puissance extraite maximale (P_{max2})

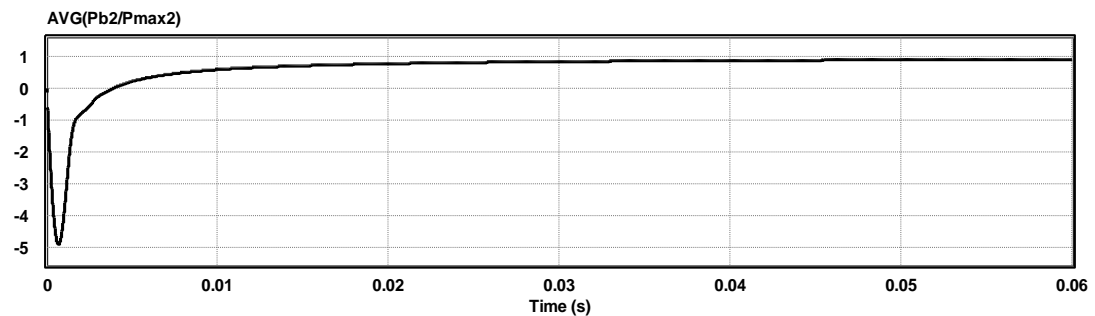


Figure (4.23) : L'efficacité moyenne obtenue avec la technique IC

4.6.2.3. Résultats de la méthode DP:

Les figures (4.24), (4.25), (4. 26), (4. 27) et (4. 28) représentent les formes d'ondes d'irradiation, les courants, les tensions, la puissance extraite, la puissance théorique maximale et le système d'efficacité moyenne obtenu avec la technique (DP).

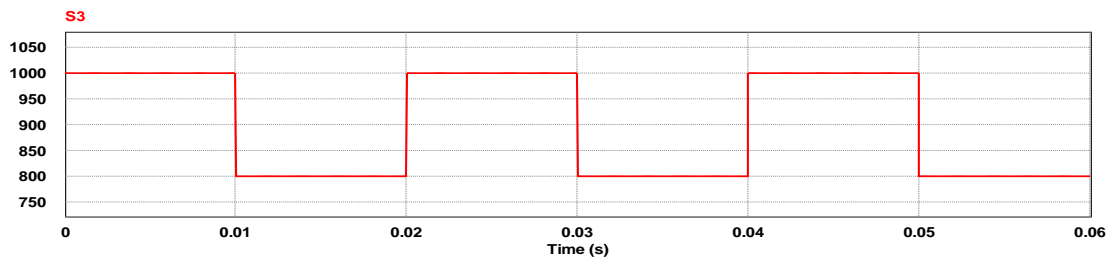


Figure (4.24) : Profil d'éclairement (S_3)

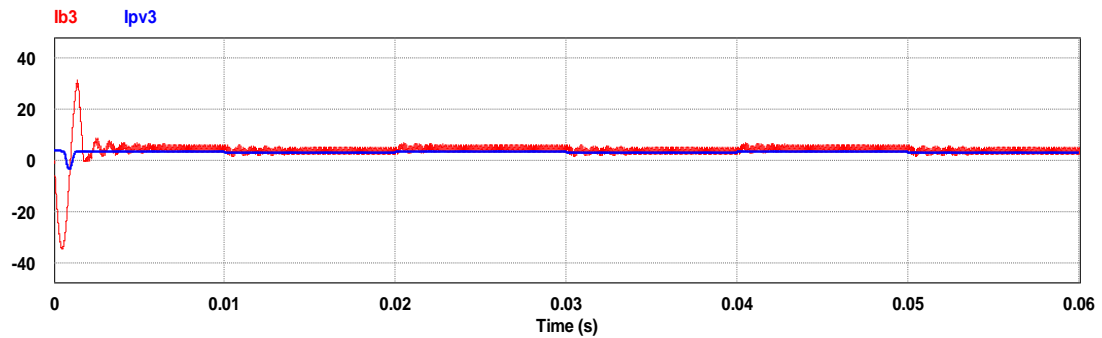


Figure (4.25) : Le courant (I_{b3}) consommé par la batterie et le courant (I_{PV3}) généré par le module PV

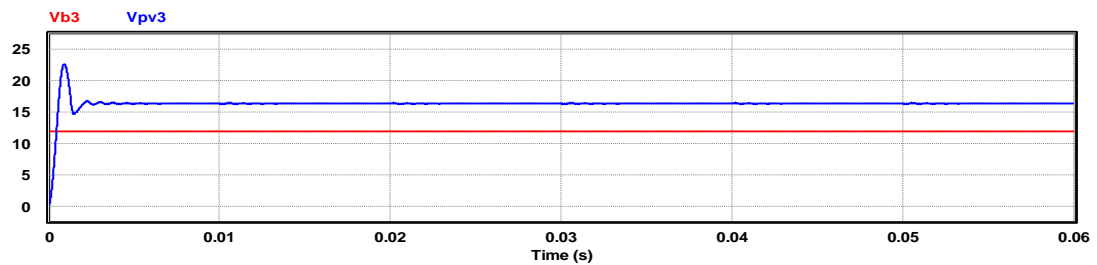


Figure (4.26) : La tension de la batterie (V_{b3}) et la tension (V_{PV3}) générée par le module PV

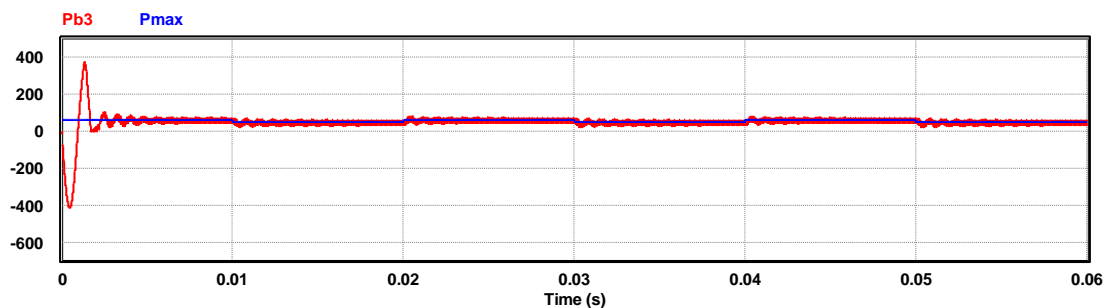


Figure (4.27) : La puissance extraite (P_{b3}) et théorique de la puissance maximale extraite (P_{max3})

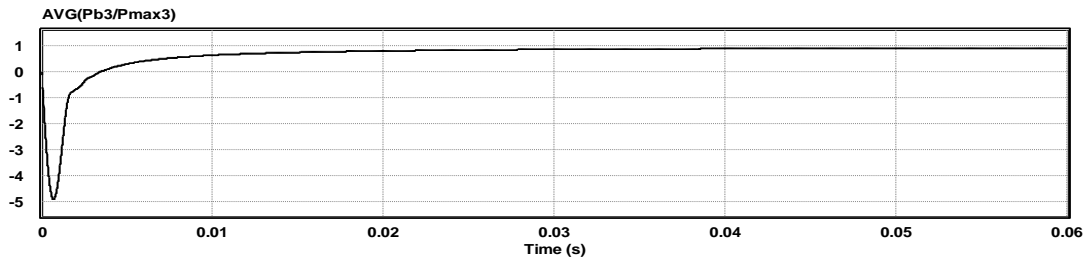


Figure (4.28): L'efficacité moyenne obtenue avec la technique DP

Le tableau 1 résume la comparaison des performances entre P&O, conductance incrémentale et méthode différentielle du premier ordre, à l'insolation $800 \text{ W} / \text{m}^2$ et à la température 25°C , respectivement.

Tableau (4-2) : Résultats de comparaison sous $800 \text{ w} / \text{m}^2$, $T = 25^\circ$

MPPT	Time response (s)	I _b	I _{PV}	V _{PV}	V _b	P _{max}	P _b	Aver(P _b /p _{max})
P&O	0.06	3.46	2.72	17.55	12	48.30	41.62	91.89%
IC	0.06	3.49	2.82	17.09	12	48.30	41.94	92.45%
FOD	0.06	3.55	2.92	16.41	12	48.30	42.65	89.80%

Tableau (4.3) : Comparaison entre différentes MPPT des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque

MPPT	Complexité	Vitesse de convergence	Implémentation	Type de capteur	Analog/Digi
(P&O)	simple	Rapide	Simple	V,I	A/D
INC	moyenne	Rapide	Moyenne	V,I	D
(dP_{pv} / dV_{pv})	simple		Simple	V,I	A/D
(GWO)	simple	Rapide	Moyenne	-	D
(Cuckoo)	simple	Variable	Moyenne	V	D
(BAT)	Simple	Rapide	Simple	-	D

4.6.2. Commandes MPPT des systèmes de conversion d'énergie éolienne

Afin d'assurer un fonctionnement optimal de la génératrice éolienne en zone B, il est nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant la poursuite des points de puissance maximale (ou du couple) dite MPPT (Maximum Power Point Tracking) basées sur un fonctionnement à vitesse variable. Les deux grandes catégories de techniques MPPT

utilisées dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont 1) les méthodes basées sur des capteurs [145], [146] et 2) les techniques sans capteurs [147], [148]. Les topologies basées sur des capteurs utilisent des capteurs mécaniques tels qu'un anémomètre pour la mesure de la vitesse du vent et un générateur tachymétrique pour les mesures de la vitesse du rotor, tandis que le dernier utilise des capteurs électriques pour la détection de tension, de courant ou de puissance. Un générateur électromécanique génère la tension approximativement proportionnelle à la vitesse. Avec une construction et une conception précises, il peut produire une tension particulière et peut servir de dispositif de mesure de vitesse pour une plage de vitesses donnée. Ce type de générateur est appelé générateur tachymétrique. La polarité de la tension générée par le générateur de tachymètre indique le sens de rotation.

Les différentes techniques MPPT utilisées sont classées en :

- 1) **Contrôle du rapport vitesse de pointe (TSR) ;**
- 2) **Contrôle basé sur une relation optimale (ORB) ;**
- 3) **Perturbation et observation (P & O) ;**
- 4) **Contrôle hybride ;**
- 5) **Techniques de contrôle intelligentes comme le contrôle de logique floue, le contrôle de réseau neuronal, etc.**

4.6.2. 1. Contrôle de la vitesse spécifique (TSR)

Dans cet algorithme, TSR est maintenu à une valeur optimale pour extraire une puissance maximale du vent en régulant la vitesse de rotation du générateur en fonction de la fluctuation de la vitesse du vent. Le TSR optimal est défini comme une valeur de référence pouvant être déterminée expérimentalement ou théoriquement [149], [150]. Cette méthode est simple et rapide car elle mesure directement la vitesse du vent. Il tire plus de puissance de la variation rapide du vent car il décrit des caractéristiques de phase non minimales avec un gain plus élevé à des fréquences plus élevées [149]. D'autre part, elle nécessite un anémomètre pour la mesure du vent, de sorte qu'une mesure continue et précise de la vitesse du vent n'est pas possible car la vitesse du vent n'est pas constante dans toute la zone balayée par les pales. L'installation d'un ensemble d'anémomètres peut être une solution pour une mesure précise du vent, mais elle augmente le coût du système. En outre, l'algorithme TSR MPPT génère des fluctuations de la puissance de sortie du générateur [151].

4.6.2. 2. *Algorithme basé sur la relation optimale (ORB)*

Cet algorithme repose sur l'établissement de relations optimales entre différents paramètres du système de conversion de l'énergie éolienne, tels que la vitesse du vent, la puissance mécanique de sortie, la tension continue redressée, le courant redressé, la puissance électrique de sortie, etc. Ces techniques utilisent une table de correspondance ou des courbes prédéfinies pour suivre le MPP. Il est également appelé contrôle de rétroaction du signal de puissance (PSF). La plupart des techniques ORB sont basées sur le test sur le terrain pour obtenir les données permettant un suivi MPPT rapide et précis. En outre, les méthodes ORB sont classées comme approches basées sur des capteurs et sans capteurs [151]

4.6.2. 3. *Algorithme Hill Climb*

Le HCS est également appelé perturbation et observation (P & O) car il observe la perturbation de puissance et fournit les corrections dans le paramètre particulier comme le rapport cyclique du convertisseur continu-continu pour contrôler la tension continue ou réguler le courant [152], [153] afin de régler la vitesse du rotor et de suivre le MPP. Cette méthode est basée sur la perturbation de la variable de contrôle par petites étapes arbitraires, et la perturbation suivante est décidée en observant les changements de la courbe de puissance dus à la perturbation précédente. L'approche P & O est un algorithme MPPT largement utilisé en raison de sa simplicité et de l'absence de capteur de vitesse mécanique ou d'anémomètre pour la mise en œuvre. Cette méthode présente les deux inconvénients suivants: une réponse lente, en particulier en cas de faible pas et un fonctionnement inefficace sous des variations de vent rapides [154]. Une oscillation importante apparaît autour du MPP si la taille du pas sélectionné est grande. Cependant, ce problème peut être éliminé en utilisant une taille de pas adaptative dépendant de la mesure échelonnée de la pente de puissance avec la variable de perturbation proposée dans [155] afin d'établir un équilibre entre la vitesse de suivi et l'efficacité de la commande. Reste toutefois le problème de la direction trompeuse par vent qui varie rapidement. Les auteurs de [156] ont proposé de modifier l'approche P & O pour supprimer le problème ci-dessus selon deux modes de fonctionnement: 1) L'approche P & O classique pour une vitesse de vent plus lente et 2) une pente de tension de condensateur basée sur un mode de prédiction pour un vent variant rapidement. Le courant redressé est sélectionné comme variable perturbatrice.

4.6.2. 4. *MPPT hybride*

Une méthode hybride est la combinaison de deux approches qui pallient les inconvénients d'une méthode en utilisant les avantages de la seconde. Un exemple de ces méthodes a été proposé par les auteurs [156], dans lequel la méthode ORB a été fusionnée avec P & O pour résoudre les deux problèmes associés à P & O conventionnels, à savoir un compromis efficacité / vitesse et une mauvaise directionnalité dans un changement de vent rapide [155].

4.6.2. 5. MPPT intelligentes

Le réseau neuronal et le contrôle basé sur la logique floue sont utilisés pour les systèmes non linéaires complexes. Par conséquent, ces approches de contrôle intelligentes sont fréquemment utilisées pour représenter des installations complexes et construire des contrôleurs avancés [157]. Le contrôleur de logique floue (FLC) ne nécessite aucune modélisation mathématique, mais son fonctionnement est basé sur un ensemble de règles dérivées du comportement du système. Les règles sont conçues de telle sorte que le contrôleur traque toujours le point de puissance maximale sans aucune connaissance des paramètres du système, des caractéristiques de l'éolienne ni des changements de vitesse du vent. Ainsi, FLC est un outil approprié pour les petits systèmes. Parmi les autres avantages notables du contrôleur de logique floue, il y a sa simplicité, sa robustesse et sa vitesse de calcul [158].

Le contrôleur basé sur un réseau de neurones artificiels (ANN) est une option rapide et fiable par rapport aux contrôleurs classiques pour une extraction maximale de la puissance à partir de l'énergie cinétique disponible du vent. Le contrôle de l'angle d'inclinaison de l'éolienne pour obtenir de meilleures performances en termes d'extraction de puissance maximale et de prévision précise de la vitesse et de la direction du vent sont les principaux domaines de travail du contrôleur ANN [151].

La comparaison de toutes les méthodes susmentionnées sont présentées dans le tableau (4.3).

Tableau (4.3): Comparaison entre différentes MPPT des systèmes de conversion d'énergie éolienne

MPPT	Vitesse de convergence	Complexité	Applications
TSR	Rapide	Simple	Convient aux systèmes de conversion d'énergie éolienne de capacité moyenne avec une région de vitesse du vent qui varie rapidement
ORB	Rapide	Simple	Convient aux systèmes de conversion d'énergie éolienne de grande capacité
<i>HILL CLIMB/P &O</i>	Variable	Simple	Adapté aux systèmes de conversion d'énergie éolienne de faible capacité et à faible coût
MPPT HYBRIDE	Rapide	Moyenne	Adapté aux systèmes de conversion d'énergie éolienne de grande capacité
<i>MPPT INTELLI GENTES</i>	Moyenne	Complexe	Adapté aux systèmes de conversion d'énergie éolienne à grande échelle

4.7. Avantages et inconvénients d'un système hybride

Le système d'énergie hybride peut présenter des avantages et des inconvénients qui peuvent résumés dans ce qui suit [159,160].

4.7.1. Avantages

- Deux sources d'énergie renouvelable ou plus peuvent être intégrées dans un seul système, en fonction du potentiel d'énergie renouvelable local ;

- Aucune forme d'émission n'est produite à partir de tous les systèmes hybrides d'énergie renouvelable (comme le PV et l'éolienne) ;
- Modulaire (PV et système de vent) sont faciles à installer et dans la plupart des cas ne nécessite aucune conception pour un usage domestique ;
- Les systèmes hybrides plus petits sont moins chers que les systèmes plus grands et complexes comme le système nucléaire ;
- Le carburant pour SEH est abondant, gratuit et inépuisable, donc l'énergie électrique produite par ce système est indépendante du prix du carburant.

4.7.2. Inconvénients

- Augmentation de la complexité du système ;
- Difficulté d'optimisation des divers organes du système ;
- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du Stockage ;
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel ;
- La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés). Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

4.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé de manière brief les différentes Classifications des systèmes hybrides ainsi, les différentes configurations des systèmes hybrides photovoltaïque/éolienne en particuliers .Les techniques MPPT des systèmes PV sont simulés sous Psim, on a sélectionné trois types de méthodes : la méthode classique (P&O), la méthode (IC) et (FOD).Les résultats de simulation ont révélé que la P&O présente un rendement supérieur par rapport aux méthodes proposées telles que l'IC et FOD. Une étude comparatives des MPPT des systèmes éoliens sont aussi présentés.les avantages et les inconvénients des systèmes hybrides sont présentés.

Références bibliographiques

[123] Vechhiu, Ionel, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Laboratoire Du groupe de recherche en électrotechnique et automatique du Havre, 2005.

[124] M. Dali, « Commande et gestion énergétique des systèmes hybrides photovoltaïque - éolien », Thèse de Doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunisie, 2009.

[125] Dhaker Abbas, « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome », Thèse de Doctorat, Université De Poitiers, 2012.

[126] Madaci Bouthaina, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs », Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Des Frères Mentouri Constantine, 2018.

[127] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université De Toulouse, 2009.

[128] M. Belhamel, S. Moussa Et A. Kaabache, « Production d'électricité au moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diésel) », Revue des énergies renouvelables, Zones Arides, 2002, Pp-49-54.

[129] Ionel Vechui, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat de L'université du Havre, Soutenue Le 15 Décembre 2005.

[130] Benlahbib, Boualam, « Supervision d'un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique », Thèse de Doctorat, 2019.

[131] Mohamed Mladjao Mouhammad Al Anfaf, « Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2016.

[132] A. Keyhani, M. N. Marwali Et M. Dai, « Integration of green and renewable energy in electric power systems», Hoboken, New Jersey, Usa: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[133] Berrazouane Sofiane, « Modeling, simulation and supervision of multi-source hybrid system for electricity production in remote areas», Thèse de Doctorat, Département de maintenance, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2014.

[134] Prabodh Bajpai And Vaishalee Dash, « Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications a review», Renewable And Sustainable Energy Reviews, Vol.16, Pp.2926 -2939, 2012.

[135] Kashe Kaviani A., Riahy G.H. And Kouhsari S.H.M, « Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/pv generating system, considering component outages», Journal of renewable energy, Vol.34, Pp.2380 - 2390, 2009.

[136] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, «Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems», Solar energy materials & solar cells, Vol: 90, N°: 11, Pp: 1555 –1578, 2006.

[137] Adel Soualmia and Rachid Chenni “Comparative Study of Three Algorithms (MPPT) Applied to Photovoltaic Systems”International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 26 No. 4 Jul. 2019, pp. 1147-1158, © 2019 Innovative Space of Scientific Research Journals, <http://www.ijias.issr-journals.org/>

[138] Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen, « Implementation of a dsp-controlled pv system with peak power tracking », IEEE trans. industrial electronics, Vol: 45, N°: 1, Pp: 99–107, 1998.

[139] Al-Diab, Ahmad, and Constantinos Sourkounis. "Variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems." *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2010 12th International Conference on. IEEE, 2010.

[140] Rezk, Hegazy, and Ali M. Eltamaly. "A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems." *Solar energy* 112 (2015): 1-11.

- [141] M. Rifai & RatnaIka P.Pemodel and An Analisis Panel Photovoltaik, Conference Informatics, Telecommunications Electrical Engineering. UGM Yogyakarta, 2012.
- [142] Balamurugan, T., and S. Manoharan. "Fuzzy controller design using soft switching boost converter for MPPT in hybrid system." *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2.5 (2012): 87-94.
- [143] Xuesong, Zhou, et al. "The simulation and design for MPPT of PV system based on incremental conductance method." *information engineering (ICIE), 2010 WASE international conference on*. Vol. 2. IEEE, 2010.
- [144] Vinodhkumar, G., and M. Sasikumar. "Performance enhancement in pv system using intelligent controller based mppt controller." *IOSR Journal of Engineering* 2.2 (2012): 284-287.
- [145] LIN, Whei-Min, HONG, Chih-Ming, CHENG, Fu-Sheng, et al. MPPT control strategy for wind energy conversion system based on RBF network. In : IEEE 2011 EnergyTech. IEEE, 2011. p. 1-6.
- [146] Heydari, M., and Smedley, K. (2015), « Comparison of maximum power point tracking methods for medium to high power wind energy systems», in proceedings of 2015 20th conference on electrical power distribution networks conference (EPDC), Zahedan, 184–189.
- [147] Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y., and Lai, J. S. (2013), « Design and analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems», *IEEE Trans. Energy Convers.* 28, 756–767.
- [148] Raza, Kazmi Syed Muhammad, et al. "Maximum power point tracking control and voltage regulation of a DC grid-tied wind energy conversion system based on a novel permanent magnet reluctance generator." 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2007.

- [149] Nasiri, M., J. Milimonfared, and S. H. Fathi. "Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines." *Energy Conversion and Management* 86 (2014): 892-900.
- [150] Balasundar, C., S. Sudharshanan, and R. Elakkiyavendan. "Design of an optimal tip speed ratio control MPPT algorithm for standalone WECS." *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol* 3 (2015): 442-450.
- [151] Ayushi Sachan, Akhilesh Kumar Gupta and Paulson Samuel, « A review of mppt algorithms employed in wind energy conversion systems », Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad, India, 2017.
- [152] Koutroulis, E. and Kalaitzakis, K. (2006), « Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications », *IEEE Trans. Ind. Electron.* 53, 486–494.
- [153] Liu, C., Chau, K. T., and Zhang, X. (2010), « An efficient wind–photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57, 831–839.
- [154] Kazmi, S. M. R., Goto, H., Hai-Jiao, G., and Ichinokura, O. (2011) , « A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems », *IEEE Trans. Ind. Electron.* 58, 29–36.
- [155] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., and Vitelli, M. (2005), « Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method », *IEEE trans. power electron.* 20, 963–973.
- [156] Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y and Lai, J. S. (2013), « Design and Analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems I», *EEE Trans. Energy convers.* 28, 3.
- [157] Xia, Y., Ahmed, K. H., Williams, B. W. (2011) A new, « maximum power point tracking technique for permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system», *IEEE trans power electron.* 26, 3609–3620.
- [158] Petrila, D., Blaabjerg, F., Muntean, N., and Lascu, C. (2012) Fuzzy, « Logic based MPPT controller for a small wind turbine system », *Proceedings of the 13th international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM)*, Brasov, 993–999.

[159] Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, Young-Man Cho, And Sung-Hoon Ahn, , « Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A review», International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, Vol.2, No.1, pp. 99-112,2015.

[160] Ludmil Stoyanov, « Structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», revue de génie industriel, vol.5, pp.1-19,2010.

Chapitre 05 :

Chapitre 05 : Étude de l'impact de l'intégration d'un générateur hybride PV-éolien sur réseau BT

« Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs, n'a jamais tenté d'innover »

« La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information »

Albert Einstein

5.1. Introduction	131
5.2. Problème des harmoniques	131
5.3. La distorsion totale	132
5.4 . Réseaux d'étude	132
5.5. Présentation générale de la méthodologie	133
5.6. Illustration de la méthodologie concernant la qualification des paramètres du réseau pour le plan de tension	134
5.6.1. Choix de l'impact	134
5.6.2.Présentation d'outil informatique	134
5.6.3. Outil d'analyse	134
5.6.3.1. Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans GER	134
5.6.3.2. Chute de tension aux bornes d'une impédance RL avec GER	135
5.6.4. Indice de qualification	137
5.7. Les approches de solution et suggestions	138
5..8. Résultats de simulation	138
5.8. 1. Simulation du réseau BT non compensé	138
5.8.2. Simulation des chutes de tensions après l'insertion d'un générateur hybride PV/éolienn	141
5.8.2.1. Compensation locale	141
5.8.2.2. Compensation globale au début des lignes	142
5.8.2.3. Compensation globale au milieu de la distance de ligne	144
5.8.3. Comparaison entre les trois techniques de compensation	146
5.9. Conclusion	147

5.1. Introduction :

Les réseaux de distribution électrique représentent un élément très important dans la chaîne du flux d'énergie électrique, qui débute dans les centrales de production et qui se termine chez des clients particuliers ou industriels. La fonction des réseaux de distribution est donc de distribuer l'énergie électrique à partir des postes haute tension vers des clients en adaptant si nécessaire le niveau de tension. [161]. Le gestionnaire de réseau de distribution électrique est tenu à respecter les aspects fondamentaux de la fourniture de l'électricité qui sont résumés comme suit :

- Continuité de la fourniture (de service), où le distributeur est appelé à assurer la disponibilité de l'électricité à tout instant.
- Qualité du produit (qualité de la tension et de la fréquence).
- Quantité du produit, le distributeur est tenu contractuellement de respecter une certaine plage de variation de la tension autour de la tension nominale ($\pm 5\%$ pour le réseau BT en zones urbaines et $\pm 10\%$ pour le réseau BT en zones rurales) [162].

Les chutes de tension qui apparaissent aux extrémités de la ligne sont dues aux pertes de la forme RI^2 , où I est le courant appelé du réseau et R la résistance de ligne. Celles-ci sont le résultat d'une demande accrue d'électricité sur la ligne. Les chutes de tension supérieures à 10% sont problématiques car elles provoquent un manque de confort pour le client; c'est la raison pour laquelle la différence de tension doit être inférieure à 10%. Depuis lors, les progrès techniques et notamment le développement d'outils informatiques ont permis de concevoir un calcul de l'état du réseau basé sur la constitution d'une base de données décrivant le réseau et sur un outil de calcul des charges appelées. A partir de la connaissance de l'architecture du réseau et de la liste des utilisateurs connectés, il est possible de calculer la chute de tension affectant une alimentation basse tension. La liaison "réseau / client" est assurée en positionnant chaque client sur le réseau lors de sa mise en service [163].

5.2. Problème des harmoniques :

Au niveau de la distribution BT, le problème des harmoniques s'est également posé avec le développement d'applications électroniques. Les harmoniques sont principalement causées par des charges non linéaires (cette non-linéarité peut être intrinsèque, comme dans le cas d'un arc ou d'un noyau magnétique saturé, ou résulter d'une commutation répétée de composants électroniques de puissance). Soumise à une tension sinusoïdale, une charge non linéaire

absorbe un courant déformé dont les composantes harmoniques ne dépendent, en première approximation, que de ses caractéristiques propres et non de celles du réseau. Cette charge se comporte dès lors comme une source de courants harmoniques [163]. Les tensions harmoniques apparaissent alors aux bornes de la charge, pour chaque rang h d'harmonique :

$$U_h = Z_h \times I_h \quad (5 - 1)$$

En désignant par I_1 la composante fondamentale de courant, le développement en série de Fourier donne :

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (5 - 2)$$

5.3. La distorsion totale THD (Total Harmonique Distorsion) : est fréquemment utilisée pour caractériser l'ensemble de la déformation harmonique par un seul nombre :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (5 - 3)$$

5.4. Réseaux d'étude :

Le réseau urbain BT choisi dans notre étude situé au nord-est de l'Algérie (Lotissement 01 Novembre, daïra de Heddada wilaya de Souk ahras). La grande dispersion de la population, la longueur du réseau et la distance qui le sépare de la source ont un impact négatif sur la qualité de la tension. Les trois exigences de base du système de distribution sont la tension appropriée, la disponibilité de l'énergie à la demande et la fiabilité. En raison des fluctuations de charge dans le système de distribution, le système de distribution souffre de faibles variations de tension. Dans un système de distribution radiale, le niveau de tension à l'extrémité la plus éloignée est plus bas et les niveaux de tension bas gênent les performances des équipements et des charges connectés au système. Il est donc nécessaire de maintenir les niveaux de tension dans la limite acceptable. [164]. Le réseau BT alimente 36 bâtiments dispatchés en quatre branches alimenté par un transformateur avec une tension primaire de 20 KV et une tension secondaire de 400 V. U_{source} est la tension en amont de l'impédance de court-circuit (R_1, X_1) qui traduit une tension U_{N1} au nœud N1 égale à la tension à la sortie du transformateur HTB/HTA. Les différentes impédances (R_i, X_i) et charges (P_i, Q_i) sont nécessaires à l'analyse de l'impact. La figure (5.1) présente le schéma du réseau BT de notre étude.

Les caractéristiques générales du réseau BT sont présentées dans le tableau (5.1).

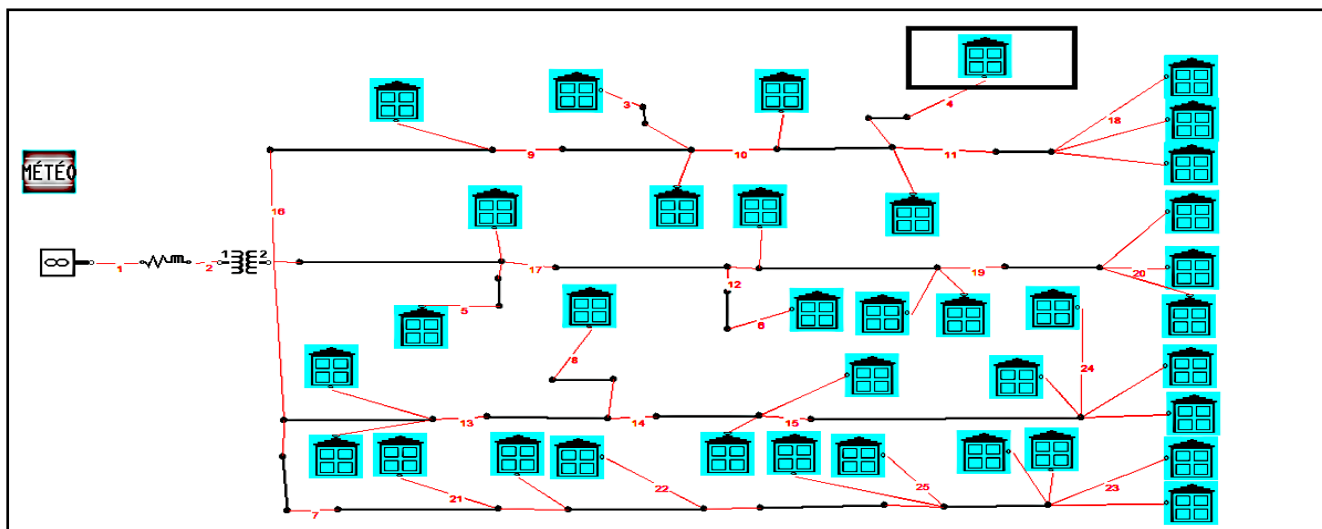


Figure (5.1) : Réseau BT urbain étudié

Tableau (5.1) : Les caractéristiques générales du réseau BT urbain étudié

	Parameteres	Valeur
Batiments	Nombre des batiments	36
Transformateur	Puissance apparente nominal	1
	Tension primaire (KV)	20
	Tension secondaire (KV)	0.4
	Tension de court -circuit (%)	6
La ligne aérienne	Longueur du client le plus éloigné (Km)	0.4
	Resistance de la ligne (ohm/Km)	0.731
	Inductance de ligne (ohm/Km)	0.085

5.5. Présentation générale de la méthodologie :

La méthodologie utilisée pour mener l'étude paramétrique est présentée ci-dessous. Ces différentes étapes sont :

- La saisie d'un réseau à partir d'une feuille graphique et d'une boîte de composants.
- La construction du réseau se fait en déposant les symboles électriques sur la feuille graphique et en les reliant entre eux à l'aide de connexions sans impédance.

Les caractéristiques des différents éléments sont alors fournies par l'intermédiaire de boîtes de dialogue.

- Le calcul de répartition des flux de puissance, la possibilité est donnée de simuler un unique point de fonctionnement ou alors une journée divisée en 24 points horaires.
- Les résultats de simulation sont directement affichés sur la feuille graphique
- Les tensions en chaque nœud (valeur efficace et phase), les courants dans chaque ligne ainsi que les flux de puissances active et réactive peuvent être visualisés ou masqués, au choix de l'utilisateur.
- Dans le cas d'une simulation sur 24h, les résultats apparaissent sous forme de courbes dans la feuille graphique, mais aussi dans le fichier de résultats (RESULTS_24H.txt) sous forme de tableaux donnant pour chaque composant et à chaque heure les puissances, courants et tensions.

5.6. Illustration de la méthodologie concernant la qualification des paramètres du réseau pour le plan de tension :

5.6.1. Choix de l'impact :

Le choix de l'impact est le plan de tension. On va qualifier les paramètres du réseau qui influent sur le plan de tension dans les réseaux de distribution de notre étude [165].

5.6.2. Outil informatique :

Dans notre étude, l'outil de simulation choisi est le logiciel JPélec. L'objectif du logiciel est d'effectuer les calculs en régime permanent sur un réseau triphasé équilibré (réseau de distribution maillé). Il se présente sous la forme d'un exécutable complètement autonome. L'interface graphique est conviviale et très facile à utiliser. Les choix effectués concernant les modèles implémentés et les valeurs par défaut des paramètres, ont eu pour objectif :

- D'une part une prise en main facile et rapide ;
- D'autre part une bonne adéquation entre les besoins de l'utilisateur en termes de précision et de simulation, et les informations qu'il est en mesure d'avoir ou d'obtenir sur le réseau et ses composants.

5.6.3. Outil d'analyse :

5.6.3. 1) Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans GER

La chute de tension en un point du réseau est la diminution de la tension mesurée en ce point par rapport à un autre situé en amont du réseau. Généralement la source d'alimentation est prise pour référence. Cette chute de tension est inévitable quel que soit le circuit électrique (nature des conducteurs considérés). Cependant elle devient inadmissible lorsque sa valeur en pourcentage est supérieure au seuil, qui est de **5%** sur un réseau électrique de tension moyenne (HTA), selon la norme **NF50160**. La relation (5-4) montre les différents types de constantes intervenants dans la chute de tension. Cette relation est alors obtenue en utilisant le triangle de Kapp [166].

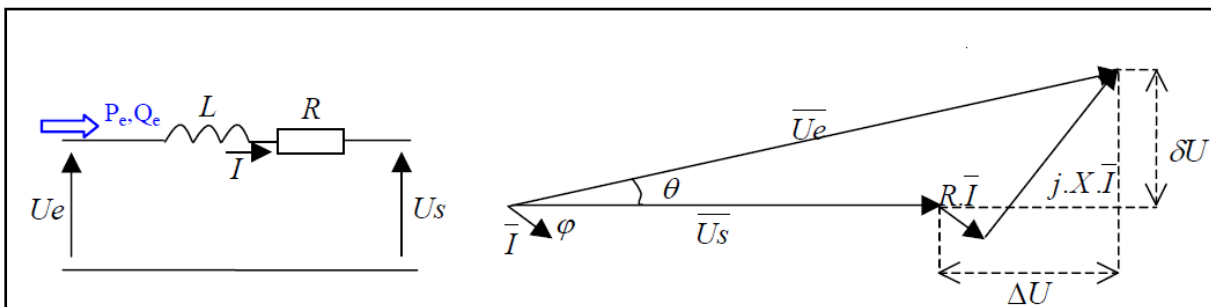


Figure (5.2): Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans GER [167]

On approxime généralement la chute de tension entre la source et la charge. On a alors

$$\Delta U = RLI \cos(\varphi) + jXLI \sin(\varphi) \quad (5 - 4)$$

Or

- R : résistance linéique (ohm/Km)
- L : longueur de la ligne(Km)
- $\cos(\varphi)$: facteur de puissance
- X : inductance linéique (ohm/Km)

Ainsi, si nous considérons le flux de puissance active et réactive qui circule dans la ligne, la formule de la chute de tension devient:

$$\Delta U = \frac{RP_e + L\omega Q_e}{U} \quad (5 - 5)$$

5.6.3. 2) Chute de tension aux bornes d'une impédance RL avec GER :

La chute de tension entre le poste source et le point de raccordement d'un producteur d'énergie via une ligne est exprimée à l'aide de la formule suivante [164]:

$$\Delta V = R \frac{P_N}{V_N} + L\omega \frac{Q_N}{V_N} \quad (5 - 6)$$

$$\Delta V = \frac{R(P_G - P_L) + L\omega(\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{V_N} \quad (5 - 7)$$

$$\Delta V = \frac{R P_N + X Q_C}{V_N} \quad (5 - 8)$$

Avec:

- ❖ R est la résistance totale de la ligne;
- ❖ L est l'inductance totale de la ligne;
- ❖ V_N est la tension au nœud N;
- ❖ P_N, Q_N les puissances active et réactive au nœud N;
- ❖ P_G, Q_G sont les puissances active et réactive fournie par le générateur;
- ❖ P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de consommation;
- ❖ Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation.

L'équation (5-5) illustre un des principaux problèmes liés à la connexion de générateurs d'énergie sur un réseau. En effet, l'injection de puissance, active ou réactive va induire une élévation de la tension au nœud de connexion. Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseau auxquels elles sont connectées. Selon la structure du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par le producteur d'énergie, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite autorisée [168]. Dans le réseau de distribution et en particulier en BT, la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique ($R_L \gg X_L$), alors:

$$\Delta V = \frac{R L P_N}{V_N} \quad (5 - 9)$$

Ainsi, la chute de tension entre le poste source et le point de raccordement N_j est

$$\Delta U(N_j) = \frac{\sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j} R_l) P_k + (\sum_{l=1}^{k \leq j} X_l) Q_k}{U_{source}} \quad (5 - 10)$$

Avec:

- ❖ U_{source} : Tension en amont de l'impédance court-circuit (R_1, X_1);
- ❖ P_1 et Q_1 : Puissance active et réactive au nœud N_j ;
- ❖ n : le nombre de nœud; $j = 1, 2, \dots, n$.

5.6.4. Indice de qualification :

L'indice de qualification choisi pour illustrer l'effet des paramètres du réseau sur le plan de tension est l'écart relatif de l'élévation de la tension due à un producteur :

$$\varepsilon_{\text{relatif}}(N_j) = \frac{U_{\text{avec_producteur}}(N_j) - U_{\text{sans_producteur}}(N_j)}{U_{\text{sans_producteur}}(N_j)} \quad (5 - 11)$$

Avec comme notation N_j l'un des nœuds du réseau et le producteur inséré au nœud g (Illustration sur la figure (5.3) avec $(g = 2)$).

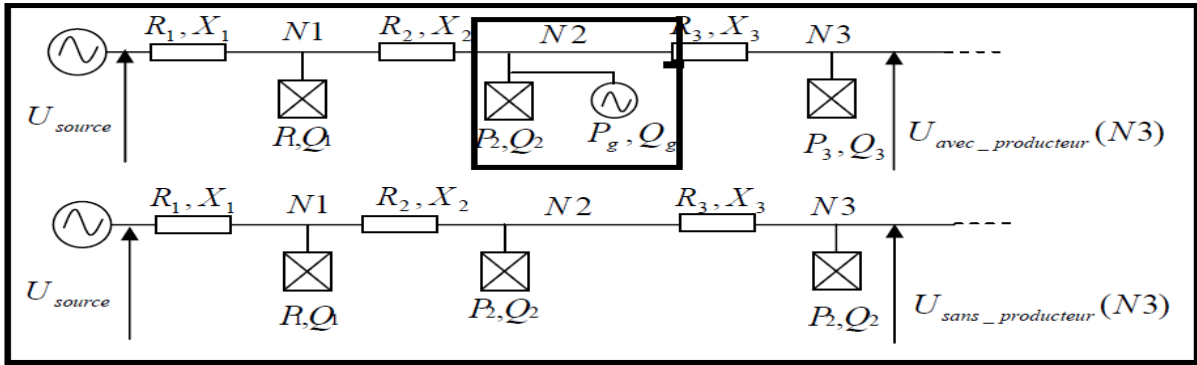


Figure (5.3): Réseau pour l'indice de qualification [167]

Si on développe cet indice, on trouve :

$$\varepsilon_{\text{relatif}}(N_j) = \frac{(U_{\text{source}} - U_{\text{avec_producteur}}(N_j)) - (U_{\text{source}} - U_{\text{sans_producteur}}(N_j))}{(U_{\text{source}} - U_{\text{sans_producteur}}(N_j))} \quad (5 - 12)$$

$$\varepsilon_{\text{relatif}}(N_j) = \frac{U_{\text{sans_producteur}}(N_j) - U_{\text{avec_producteur}}(N_j)}{(U_{\text{source}} - U_{\text{sans_producteur}}(N_j))} \quad (5 - 13)$$

En utilisant la formule approchée de la chute de tension, on obtient :

- Avant le nœud de la GED :

$$\varepsilon_{\text{relatif}}(N_j \text{ avant}) = \frac{P_g (\sum_{k=1}^{\text{Javant}} R_k) + Q_g (\sum_{k=1}^{\text{Javant}} X_k)}{U_{\text{source}}^2 - (\sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq \text{Javant}} R_l) P_k + (\sum_{l=1}^{k \leq \text{Javant}} X_l) Q_k)} \quad (5 - 14)$$

- Après le nœud de la GED :

$$\varepsilon_{relatif}(N_j \text{ après}) = \frac{P_g(\sum_{k=1}^g R_k) + Q_g(\sum_{k=1}^g X_k)}{U_{source}^2 - (\sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j \text{ après}} R_l) P_k + (\sum_{l=1}^{k \leq j \text{ après}} X_l) Q_k)} \quad (5 - 15)$$

5.7. Les Approches de solution et suggestions :

En considérant tout ce qui précède, nous allons proposer quelques approches de solutions et suggestions, à savoir :

- ❖ le renforcement du réseau BT, ce qui passe par un redimensionnement des câbles, afin de réduire les pertes en ligne par effet joule ;
- ❖ la création de nouveaux postes de transformation sur le départ, afin de rapprocher les abonnés des postes de transformation ;
- ❖ équilibrer les phases, lors de raccordements de nouveaux abonnés en BT afin de ne pas surcharger les mêmes phases ;
- ❖ la diminution de la puissance réactive transportée par les lignes du départ, en insérant des batteries de compensation électrique pour produire la puissance réactive proche des charges, qui elles, ont un caractère capacitif. Ici, le but est d'amener $\tan\varphi$ à la moyenne recherchée, c'est-à-dire, faire tendre $\cos\varphi$ vers la valeur **1**, conformément à la formule (5-4) ;
- ❖ le renforcement du réseau BT par des générateurs hybride PV-Eolien, lors de raccordement de nouveaux abonnés afin de compenser les chutes de tension, ici le but est d'améliorer la qualité de la tension en bout des lignes. Cette solution représente notre contribution dans ce travail.

5.8. Résultats de simulation :

5.8. 1. Simulation du réseau BT non compensé :

La figure (5.4) présente le réseau électrique BT avant l'insertion d'un générateur hybride PV-éolien

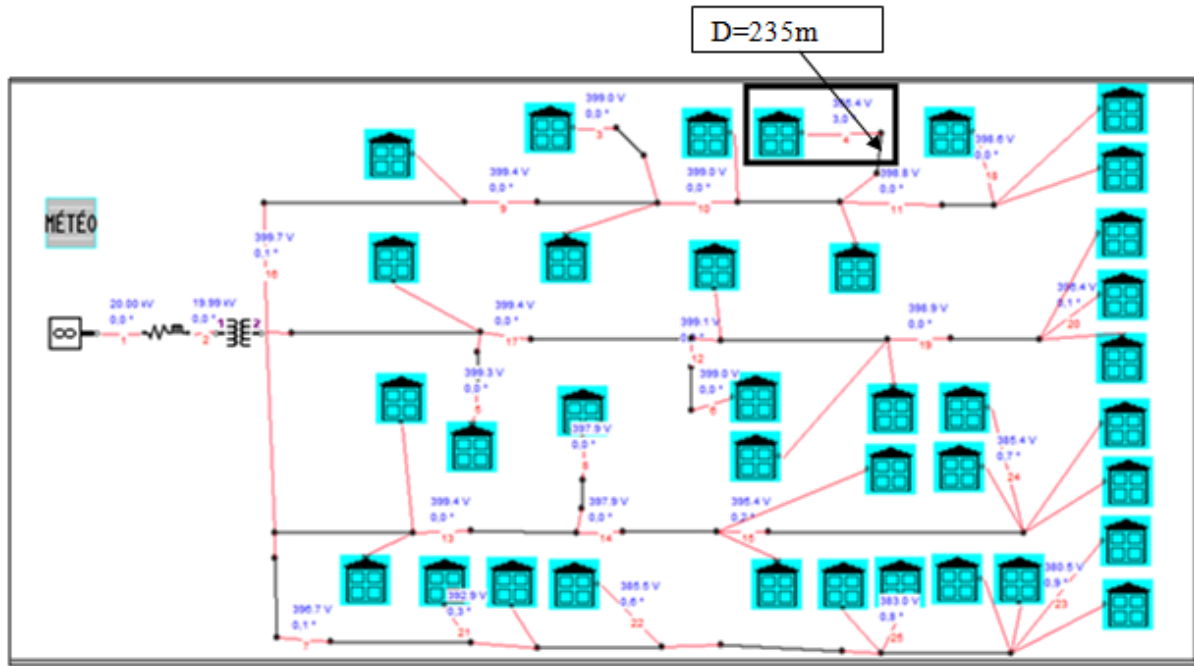


Figure (5.4): Réseau électrique BT avant la compensation

La figure (5.5) présente le profil de charge horaire typique d'un bâtiment du nœud (04) dont la tension mesurée est de 347.4V, la puissance active et la puissance réactive consommées sont 2.08 KW, 1.01 Var respectivement. Les résultats de simulation montrent que les paramètres de charge est très variable et non régulier avec un point de pic qui se situe à 3229 W (puissance active) et 1564 Var (puissance réactive) entre 19 h et 20 h. Ce point de consommation est dû à l'utilisation des appareils électriques (les lampes d'extinction, machines électroménagères...). La tension baisse lors des heures de pointes (18h-20h) figure (5.6), par contre le courant transité par la ligne augmente d'une manière notable figure (5.7).

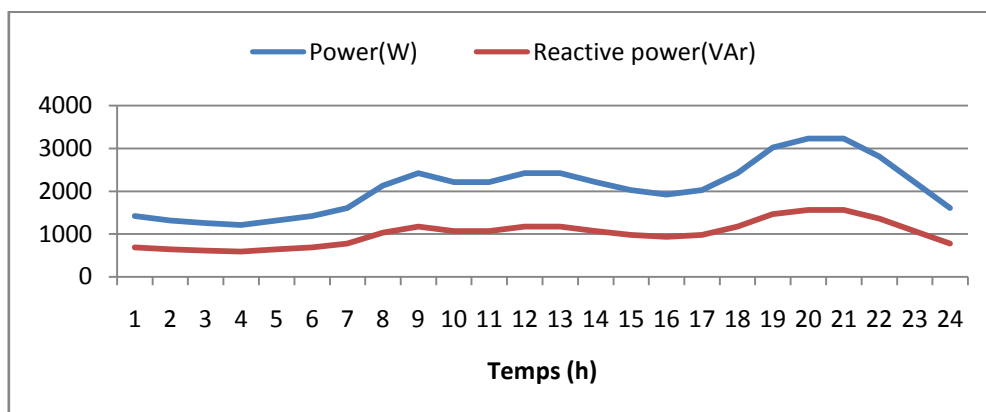


Figure (5.5) : Puissance active, puissance réactive consommées par un bâtiment type

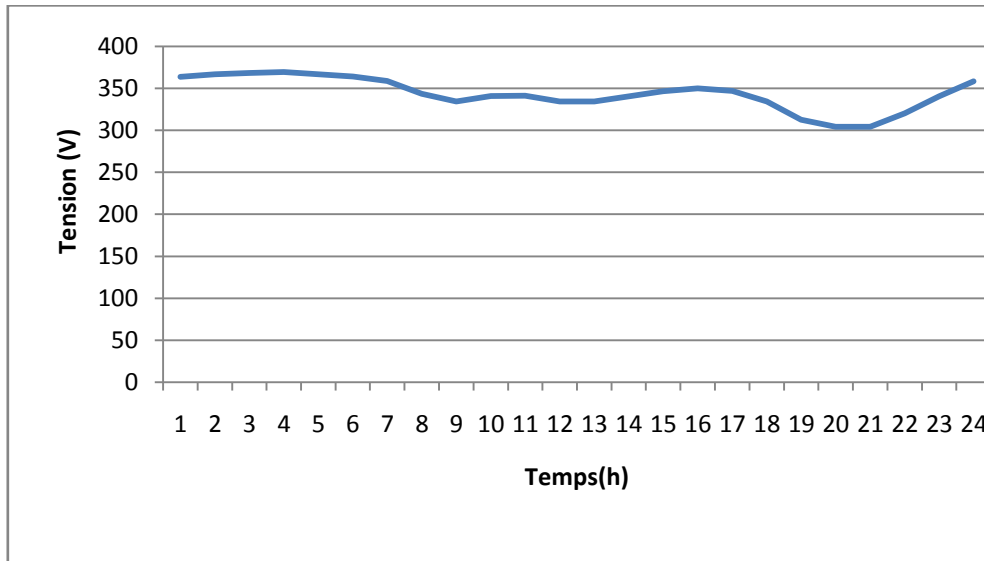


Figure (5.6) : Allure de la tension chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (Bâtiment 04) avant l'insertion des systèmes hybride PV/éolien

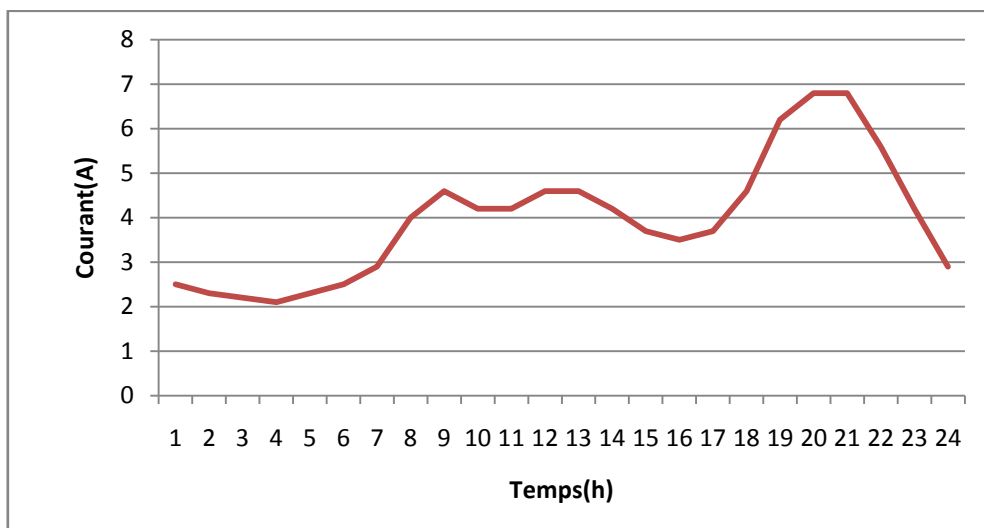


Figure (5.7) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (Bâtiment 04) avant l'insertion des systèmes hybride PV/éolien

Les résultats de simulation montrent que la chute de tension dans la ligne BT étudiée dépasse la limite admissible à partir du bâtiment n°04 situé à 0.235km du poste de transformateur MT/BT pour la branche 1. Les pertes électriques dans la ligne (11-4), est : 9266 Wh. Donc, notre système doit se renforcer par des générateurs hybrides PV/éolien dans les points où la chute de tension est inacceptable afin d'améliorer la qualité de tension en bout des lignes.

5.8.2. Simulation des chutes de tensions après l'insertion d'un générateur hybride PV/éolienne :

5.8.2.1. Compensation locale :

La compensation local est l'insertion des systèmes hybride PV/éoliens chez les abonnés BT la où la chute de tension est inadmissible. Ainsi, chaque client va produire de l'énergie en adéquation à son besoin. L'ajout d'un ou plusieurs producteurs d'énergie peut créer localement une ou plusieurs élévations de tension. Ces élévations peuvent se transformer en surtensions et dépasser les limites admissibles .Le réseau électrique après insertion de générateurs hybride PV-éolien est illustré dans la figure (5.8).

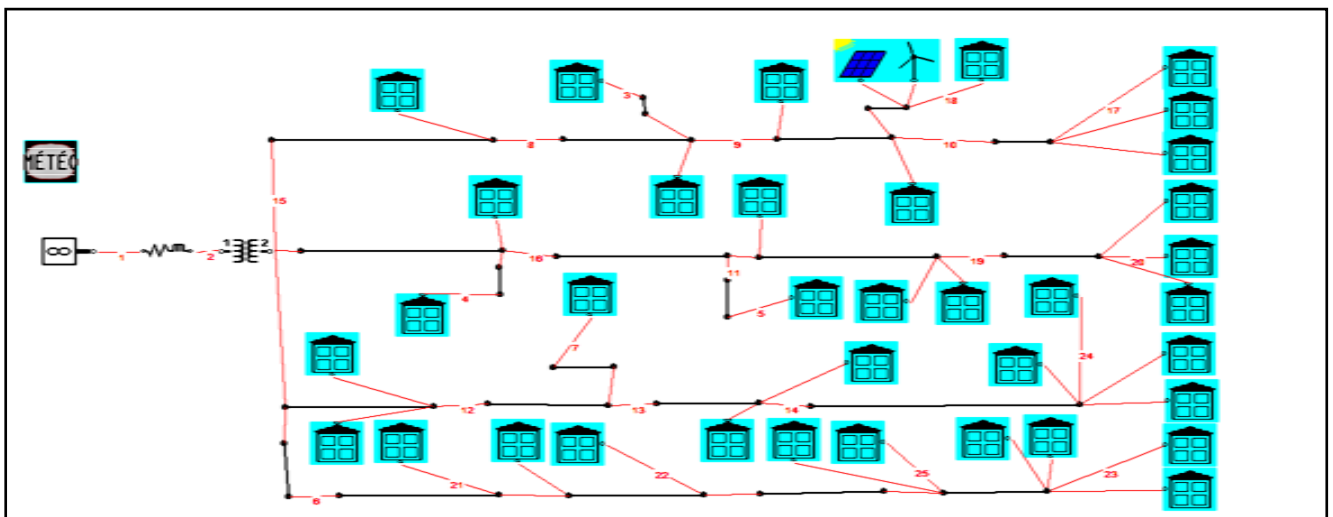


Figure (5.8): Le réseau électrique BT après la compensation locale

Les figures (5.9), (5.10) illustrent les profils de tension et de courant après la compensation locale au niveau du 4^{ème} bâtiment de la 1^{ère} branche la où la chute de tension est inacceptable.

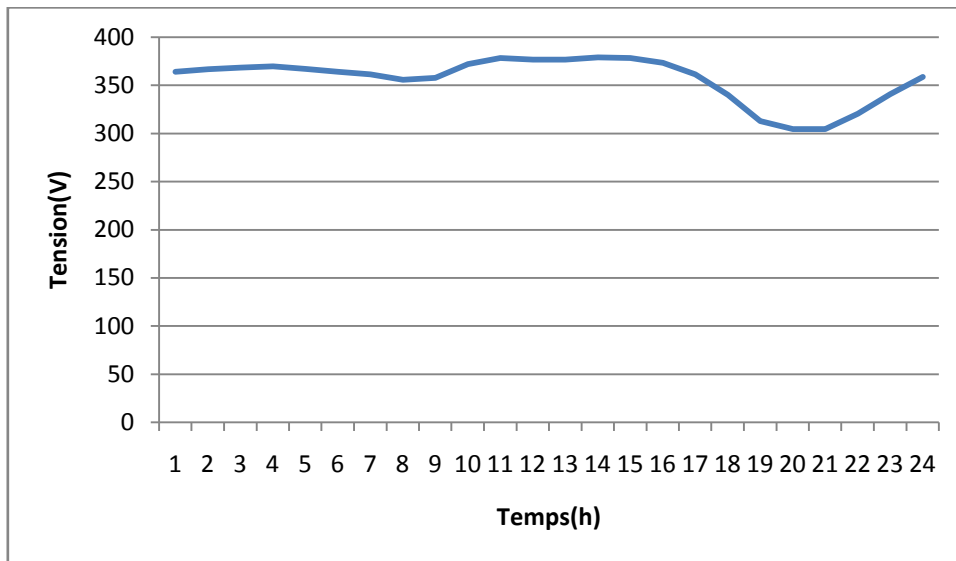


Figure (5.9) : Allure de la tension chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (bâtiment 04) après la compensation locale

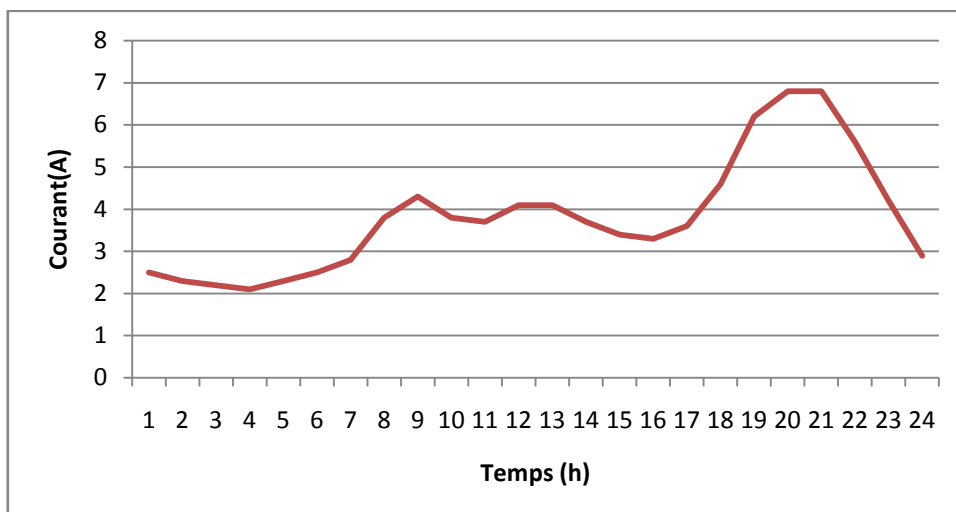


Figure (5.10) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (nœud 04) après la compensation locale

Les résultats de simulation montrent que les générateurs hybrides PV/éolien fournissent une quantité importante de l'électricité propre aux abonnés, et une nette amélioration de la tension entre 6h et 15 h. Une réduction remarquable du courant chez les clients afin de compenser la chute de tension entre 6h et 15 h.

5.8.2.2. Compensation globale au début des lignes:

La figure (5.11) illustre le schéma du réseau électrique BT après la compensation globale au début de la 1^{ère} branche.

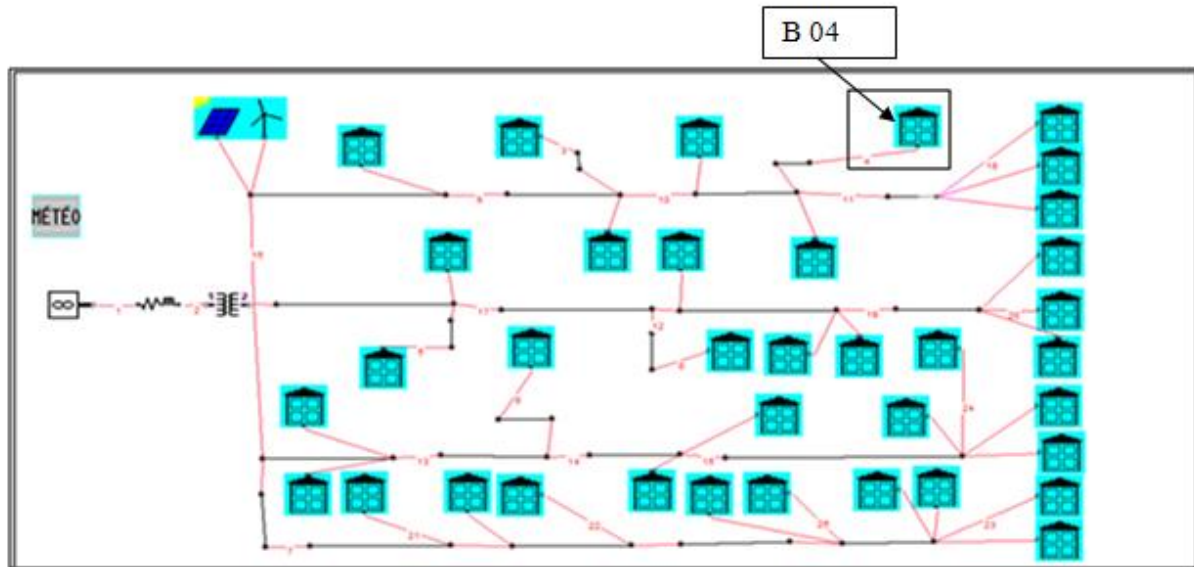


Figure (5.11): Le réseau électrique BT après la compensation globale au début de la 1^{ère} branche

Les figures (5.12), (5.13) illustrent les profils de tension et de courant après la compensation locale au niveau du 4^{ème} bâtiment de la 1^{ère} branche là où la chute de tension est inacceptable.

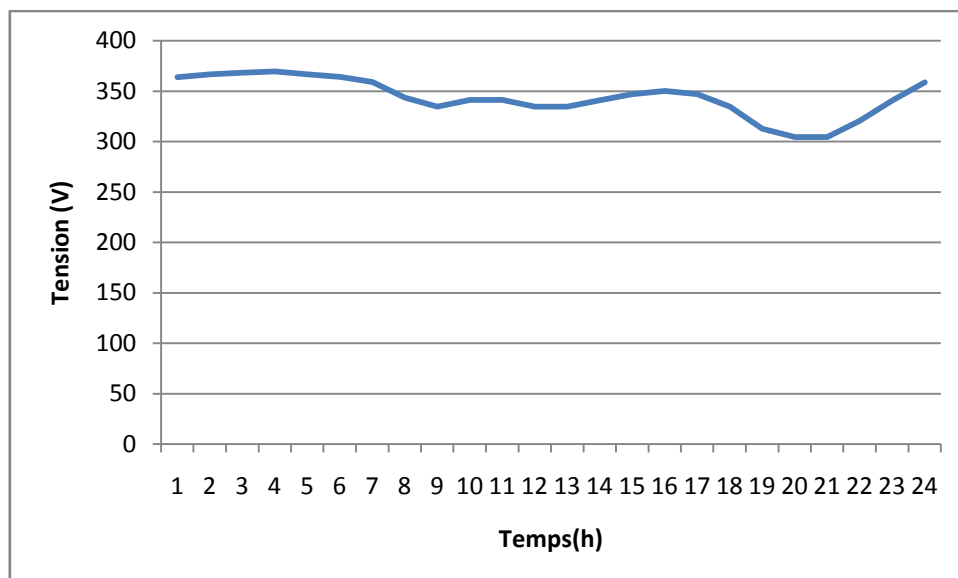


Figure (5.12) : Allure de la tension chez un abonné (Bâtiment 04) après la compensation globale au début de la 1^{ère} branche

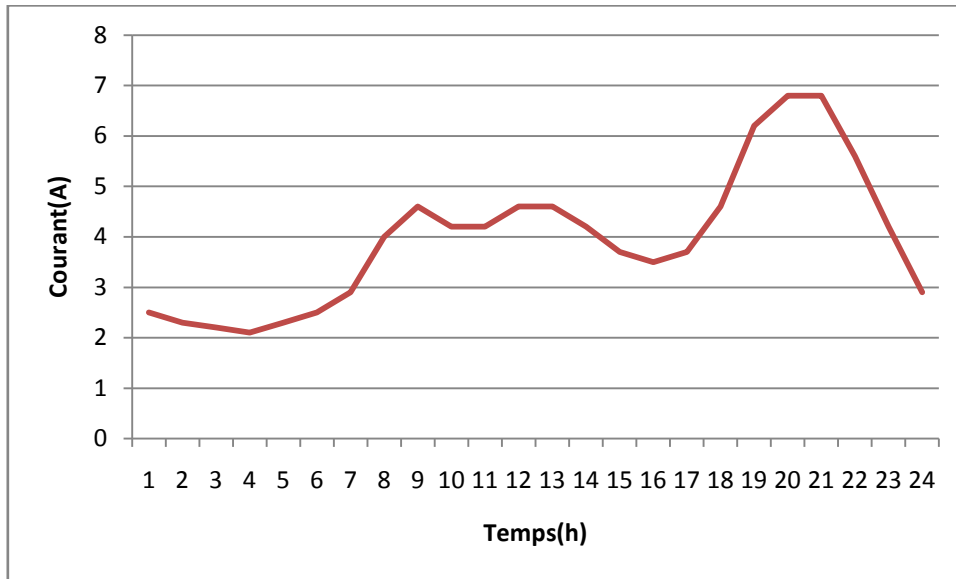


Figure (5.13) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (Bâtiment 04) après la compensation globale au début de la 1^{ère} branche

L'analyse des résultats trouvés à partir de la simulation des systèmes après la compensation globale au début de la 1^{ère} branche ne montrent aucune amélioration des valeurs de la chute de tension par rapport à celles des systèmes non compensés. Donc, la compensation globale n'a pas pu fournir une quantité d'électricité satisfaisante.

5.8.2.3. Compensation globale au milieu de la distance de ligne :

La figure (5.14) illustre le schéma du réseau électrique BT après la compensation globale au milieu de la distance de la ligne pour la 1^{ère} branche ou la chute de tension inadmissible.

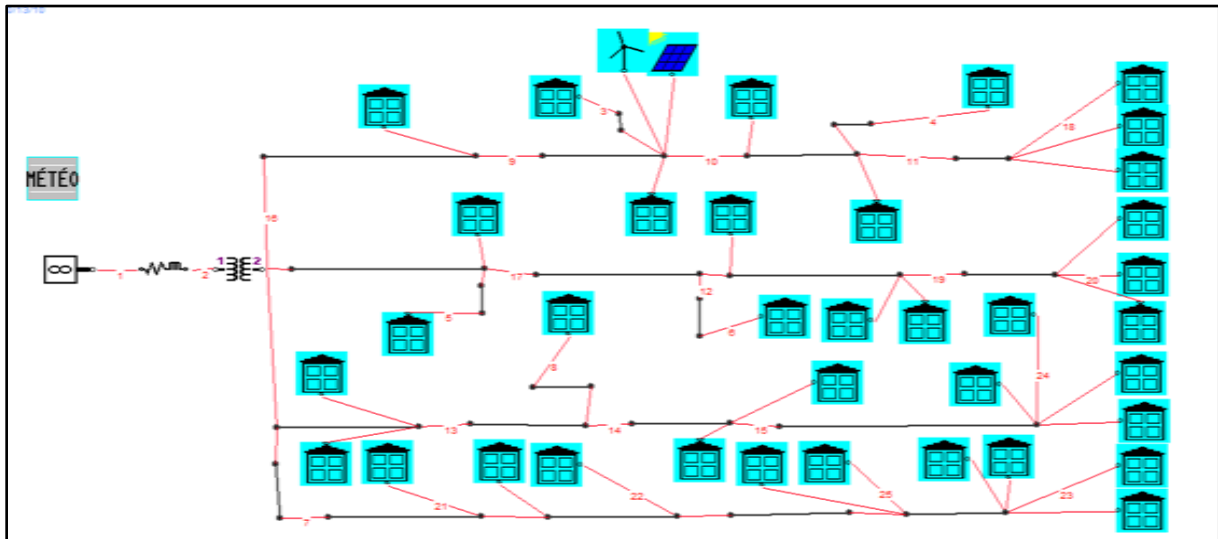


Figure (5.14): Le réseau électrique BT après la compensation globale au milieu de la distance de ligne

Les figures (5.15), (5.16) illustrent les profils de tension et de courant après l'intégration des générateurs hybrides PV-éolien au milieu de la distance de ligne de la 1^{ère} branche la où les chute de tension est inacceptable.

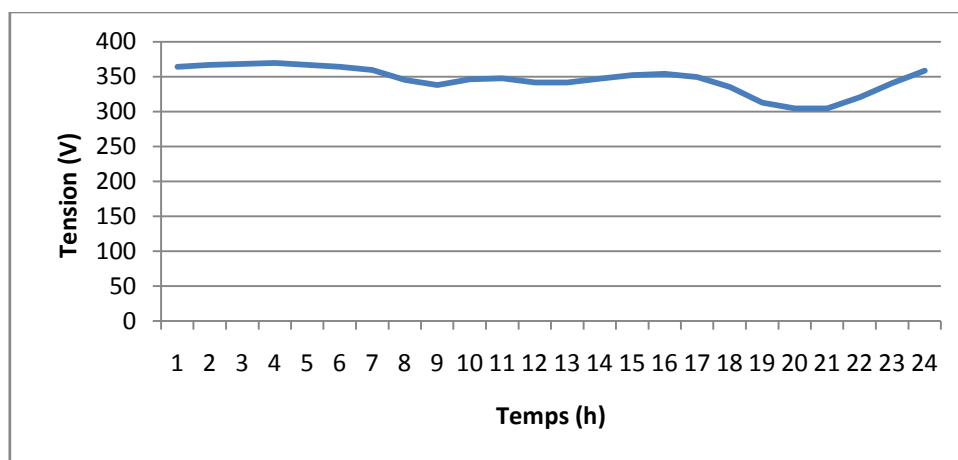


Figure (5.15) : Allure de la tension chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (nœud 04) après la compensation globale au milieu de la distance de ligne

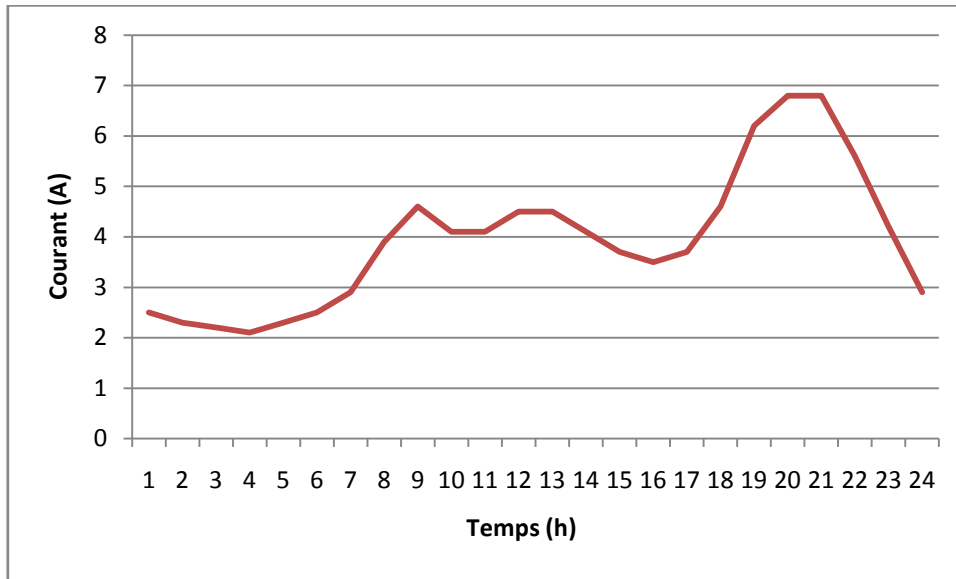


Figure (5.16) : Allure du courant transité en ligne chez un abonné de la ligne BT de la 1^{ère} branche (nœud 04) après la compensation globale au milieu de la distance de ligne

L'analyse des résultats de simulation de la compensation globale au milieu de la distance de la ligne présente des valeurs de chute de tension incluant dans l'intervalle admissible (inférieures à 5%) pour tous les abonnés, ce qui confirme le rôle et l'efficacité de ce type de compensation.

5.8.3 Comparaison entre les trois techniques de compensation :

Les figures (5.17), (5.18) illustrent les profils de tension et des courants transités chez un abonné (Bâtiment 04) avant et après la compensation.

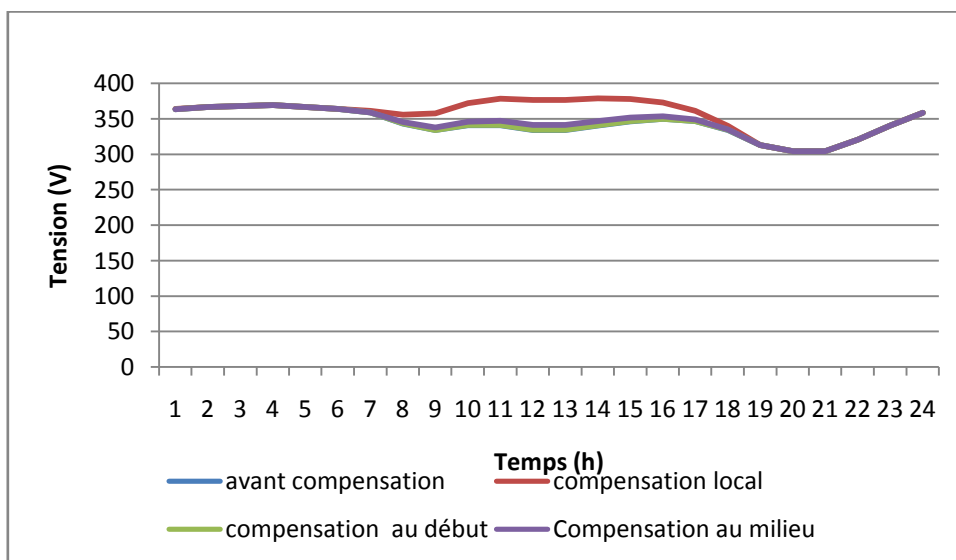


Figure (5.17) : Profils des tensions chez un abonné (Bâtiment 04) avant et après la compensation

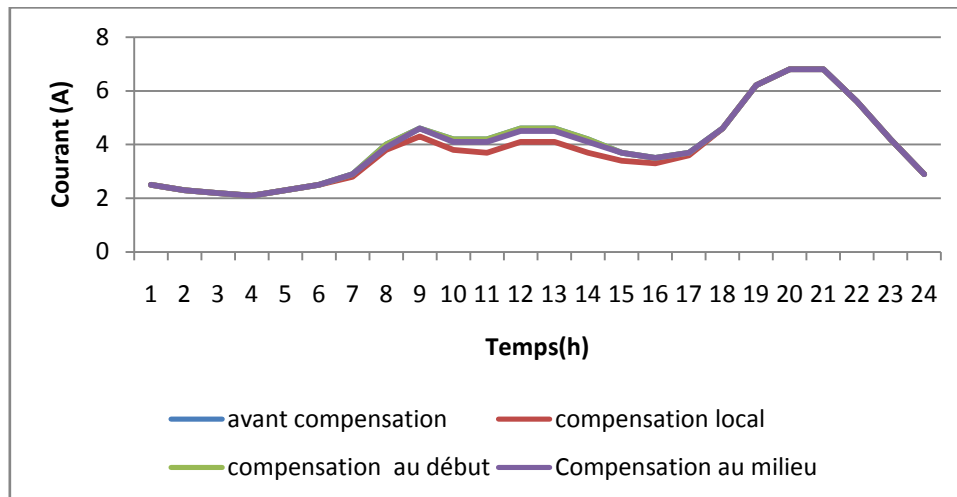


Figure (5.18) : Allures des courants transités chez un abonné (Bâtiment 04) avant et après la compensation

D'après les résultats obtenus, il est à noter que la compensation locale est meilleure que les deux autres techniques de compensation, la compensation globale branchée au début de la ligne n'est pas efficace.

4.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, les conséquences des chutes de tension ont été présentées. Les différentes méthodes de compensation de tension ont été illustrées. Les résultats obtenus de différentes simulations réalisées ont permis un réglage de la tension ainsi que les puissances active et réactive lors de la connexion d'un producteur (PV - éolien) dans le réseau électrique BT. Les générateurs d'énergie modifient aussi le plan de tension des réseaux électriques. En fait, le dimensionnement du réseau est réalisé de manière à avoir une chute de tension admissible sur toute la longueur des départs. Ainsi, en l'absence de production d'énergie, la tension décroît progressivement avec la distance du poste source vers le dernier consommateur en fonction de l'impédance des câbles et des charges. L'ajout d'un ou plusieurs producteurs d'énergie peut créer localement une ou plusieurs élévations de tension. Ces élévations peuvent se transformer en surtensions et dépasser les limites admissibles, notamment en cas de faible charge sur le réseau. D'après les résultats de simulation nous pouvons conclure que la compensation globale branchée au début de la ligne n'est pas efficace, la compensation locale et globale branchée au milieu de la distance des lignes donne des bons résultats, mais la compensation locale est préférable, à cause de son cout réduit par rapport à celui de la compensation globale.

Références bibliographiques

- [161] Egor. Gladkikh, « optimisation de l'architecture des réseaux de distribution d'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université Grenoble ALPES spécialité génie électrique 2006.
- [162] « Compensation partielle et globale du réseau électrique BT à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque », A.Y. Kadri et A. Hamidat, 2009.
- [163] « Méthode d'une étude BT » document de SONALGAZ.
- [164] Pradeepa, Ha, et al. "Optimal allocation of combined DG and capacitor units for voltage stability enhancement." *Procedia Technology* 21 (2015): 216-223.
- [165]] Kadri, A. Y., and A. Hamidat, « Connecting Impact of the PV Mini-Power on voltage and load of LV network », Third international conference on electrical engineering-icee. Vol. 9. 2009.
- [166] Berseneff, Boris, « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur, Thèse de Doctorat. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2010.
- [167] R.Caire, gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2004.
- [168] [www .hydroquebec. corn/ affaires/service-a-la-clientele/gualite-de-londe](http://www.hydroquebec.com/affaires/service-a-la-clientele/gualite-de-londe).



Conclusion générale

L'utilisation des énergies renouvelables prend de nos jours une grande importance, presque dans tous les domaines. On trouve que l'exploitation de ces énergies concerne beaucoup plus les énergies PV et les éoliennes avec bien sûr un système de stockage d'énergie dépendent leur type. L'intégration de ces types d'énergies avec d'autre système d'énergie renouvelable ou non comme les énergies conventionnels constitue un système nommé « hybride », qui demeurent une solution optimale et qui donnent des avantages par rapport à un système PV pur ou éolien pur dépendent de beaucoup facteurs fondamentaux tels que: la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne et le champ photovoltaïque, la connexion au réseau etc....

Le but du travail présenté dans cette thèse, est la contribution à l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes hybride de production d'électricité, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne), ainsi que le raccordement de ce système hybride au réseau de distribution basse tension afin d'améliorer de la chute de tension. A cet effet, une méthodologie d'analyse basée sur la prise en compte des perturbations climatique a été entreprise et ce concernant ces deux sources d'énergie.

Dans le début de ce travail on a dressé un rappel sur les différents types de Réseaux d'énergie électrique suivi par un état de l'art sur les systèmes de production décentralisée à base des énergies renouvelables ainsi que les différents éléments qui les construisent.

La modélisation de la chaîne de conversion (photovoltaïque) et la chaîne éolienne ont été effectuées en détaille dans le deuxième et le troisième chapitre. Dans ce contexte, on a modélisé chaque bloc de la chaîne de conversion d'énergie du système.

Les différentes classifications des systèmes d'énergies hybrides ainsi, les différentes configurations des systèmes hybrides photovoltaïque/éolienne, les techniques d'optimisation des systèmes hybride PV-éolien ont été effectuées en détaille dans le quatrième chapitre.

Dans le dernier chapitre la méthodologie utilisée pour mener l'étude paramétrique est présentée, l'outil de simulation choisi est le logiciel JPélec, les approches de solution et suggestions sont aussi présentées, les différentes méthodes de compensation de tension telle que la compensation locale, la compensation global au débit des lignes, la compensation globale au milieu de la distance des lignes ont été effectuées en détaille. Les résultats obtenus montrent que la compensation globale branchée au début de la ligne n'est pas efficace, par contre la compensation locale et globale branchée au milieu de la distance des lignes donne

des bons résultats, mais la compensation locale est meilleure, à cause de son cout réduit par rapport à celui de la compensation globale.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse peuvent être continués et améliorés.

En effet, une suite logique à ces travaux serait de :

- ✓ Etudier l'optimisation d'un système d'énergie hybride (PV/éolien) en ajoutant d'autres sources d'énergie renouvelable telles que (la géothermie, la biomasse, hydraulique, etc...) ou même conventionnelles avec l'intégration d'autres types de systèmes de stockage d'énergie comme (l'hydrogène, électrolyser, supra-condensateur etc...) avec la connexion au réseau électrique ;
- ✓ Développer d'autres méthodes métaheuristiques nouvelles dont le but de résoudre le problème d'optimisation.
- ✓ Développer d'autres méthodes de réglage de tension et comparer les résultats obtenus avec ceux des travaux réalisés;
- ✓ Valider les résultats par un banc d'essais.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] V.T Khanh, «Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique», Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2009.
- [2] CeaMemento Sur L'énergie 2009, Commissariatàl'énergie atomique, Energy Hanbook. 2009.http://Www.Cea.Fr/Content/Download/23534/379632/_Le/Cea_Memento_Sur_L-Energie_2009.pdf.
- [3] Berseneff, Boris, « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur.», Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Grenoble(G2elab), Décembre2010.
- [4] Aissaoui Ahmed, « Planification des réseaux électriques de distribution pour une présence massive de la génération d'énergie dispersée », Thèse de Doctorat en Sciences, UniversitéDjilaliLiabes, Sidi-Bel-Abbès, 2016.
- [5] Egor Gladkikh, « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution d'énergie électrique », Thèse de Doctorat en Génie Electrique. Université Grenoble Alpes, 2015.
- [6] K. Nadhir, «Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée», Thèse de Doctorat, Université de Batna, Année2014.
- [7] J.C. Sabonnadière, N.Hadjsaid, «Ligne et Réseau Electrique Vol 1 », 1ère Edition Lavoisier. Année 2007.
- [8] Labeled Djamel, « Production décentralisée et couplage au réseau », Thèse de Doctorat, Université frères Mentouri Constantine, Année 2008.
- [9] T, Thupham, « Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [10] P. Abadie, « Journal officiel de la république française, arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique », 25 Avril 2008.
- [11] J.-F. Canard, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble ,12 Décembre 2000.
- [12]Wendy Carolina Briceno Vicente,« Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes », Thèse de Doctorat G2ELab – Laboratoire de génie électrique, Université de Grenoble, 2012.
- [13] S. Martino, « Characteristics of the production », Électricité de France (Edf), June 2001.
-

- [14] Dung, Tran Khanh Viet, « Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au Réseau », Thèse de Doctorat, Québec: Université du Québec- Trois-Rivières, 2009.
- [15] P. Sanchis, J. Lopez, A. Ursua and L. Marroyo, « Electronic control device for the analysis and design of photovoltaic systems », IEEE Power Electronics Letters, Vol 3, Pp. 57-62, June 2005.
- [16] Wu, Bin, et al. Power conversion and control of wind energy systems. Vol. 76. John Wiley & Sons, 2011.
- [17] D. Thirault, « Architectures des réseaux de distribution pour l'électrification rurale des pays en développement », Thèse de Doctorat en Génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004.
- [18] Blunden, L. And Bahaj, A, « Energy resource assessment for tidal stream generators », Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part A: Journal of Power 2007.
- [19] O. Rourke, F. Boyle, F. And Reynolds. A, « Tidal Energy Update 2009 », Applied Energy, 87(2):398–409, and Energy, 221(2) :137–146.2010.
- [20] Minh Huynh Quang, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.2013.
- [21] Hau, E, « Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics », Springer Verlag. (2006).
- [22] Luque, A. And Hegedus, S, « Handbook of photovoltaic science and engineering », Wiley.2010.
- [23] Stiebler, M, « Wind energy systems for electric power generation », Springer Verlag. (2008).
- [24] SAIB Samia, « Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas — Setif1, Faculté de Technologie, 2018.
- [25] Mekemeche Abdelkader, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [26] NAIM, Hocine, « Étude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran, 2016.
- [27] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/1/ChapitreI.pdf> .
-

- [28] Sahouane, Nordine, « Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel », Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen 2016.
- [29] Miloud, Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités », Thèse de Doctorat en Physique. Université de Mostaganem, 2016.
- [30] M. Angel, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, Septembre, 2006.
- [31] A. Labouret, M. Viloz "Energie solaire photovoltaïque" Le manuel du professionnel, Paris, 2003.
- [32] A. Lauger J-A. Roger Technique et documentation « les photopiles solaires », Année 1981.
- [33] Belkaid, Abdelhakim, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2018.
- [34] M. Oukachmih, « Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques », Thèse de Doctorat en électronique option matériaux, technologies et composants, université Paul Sabatier, 2003.
- [35] Boccaletti, C., et al. "Energy models for stand alone power systems." EETI-5th International Congress on Energy. 2004.
- [36] Hadji, Slimane. Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque. », Thèse de Doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018.
- [37] Toumi, Sihem, « Etudes des composants électroniques (cellules solaires, diodes schottky) en utilisant les algorithmes génétiques et le langage VHDL AMS », Thèse de Doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, 2012.
- [38] MEENA AGGARWAL, A. KAPOOR, K.N. TRIPATHI, "Solar cell array parameters", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 45, pp 377-384 , 1997.
- [39] R. Chenni, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », Thèse de Doctorat en sciences en physique énergétique, Université De Constantine, 2007.
- [40] Walker, Geoff. "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model." Journal of Electrical & Electronics Engineering 21.1 (2001): 49-56.
- [41] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, Member, IEEE, And Nicholas C. Voulgaris, « Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system », IEEE transactions on power electronics, 2001.
-

- [42] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, université de Toulouse, Janvier 2009.
- [43] J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, « A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping », IEEE transactions on electron devices, Vol. 46, No. 10, October 1999.
- [44] C. G. Justus, W. R. Hargraves et A. Yalcin, « Nationwide assessment of potential output from wind powered generators », Journal of applied meteorology, Vol. 15, Pp.673–678, 1976.
- [45] Nachida Kasbadji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique eolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen, 2006.
- [46] J. P. Hennessey, Jr. Some, « Aspects of wind power statistics », Journal of applied meteorology, vol.16, pp. 119–128, 1977.
- [47] Bencherif Mohammed, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension », Thèse de Doctorat en science, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen ,2015.
- [48] Yann Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, école normal supérieur d'art et métiers, 2004.
- [49] Khenfer Riad, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes a base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques », Thèse de Doctorat .Université Ferhat Abbes - Sétif 1,2015.
- [50] Stéphane Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [51] Protin, Ludovic, and Stephan Astier. "Convertisseurs photovoltaïques." Techniques de l'ingénieur. Génie électrique 5.D3360 (1997): D3360-1.
- [52] Irwin, J. David, and H. RASHID MUHAMMAD. "Power electronics handbook." University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright (2001).
- [53] Menadi, Abdelkrim, « Commande Par Les Techniques Intelligentes D'un Système Photovoltaïque Connecté Au Réseau », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.
-

- [54] H. Colin , C. Duvauchelle , G. Moine ,Y. Tanguy, B. Gaiddon, T. Tran-Quoc , « Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique a basse tension», cadre réglementaire, impacts et préconisations, Esprit,2010.
- [55] Arrêté du 24 décembre 2007 pris en application du décret no 2007-1826 du 24décembre 2007 relatif aux niveaux de qualité et aux prescriptions techniques en matière de qualité des réseaux publics de distribution et de transport d.'électricité.
- [56] “Recommendations for Utilities.” IEE PV Upscale, WP4-Deliverable 4.4, 2008.
- [57] Y. Ueda (Tokyo University) , « Detailed performance analyses results of grid-connected clustered pv systems in Japan—first 200 systems results of demonstrative research on clustered PV systems», 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 2005.
- [58] Kageyama, H, T. Yamada, T. Oozeki, K. Kato, and Y.Hishikawa, « Measurement of inrush-current waveforms for modelling reactance characteristics of pv modules, In 26th european photovoltaic solar energy conference and exhibition, 2011. P. 3430-3433.
- [59] Thomson, M., and D. G. Infield. "Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems." IET Renewable Power Generation 1.1 (2007): 33-40.
- [60] SHARMA, Shivani et PAREKH, B. R. Impact of pvps (photovoltaic power system) connection to grid in urban areas. In : National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology. 2011. p. 1-5.
- [61] Eltawil, M.A. and Z. Zhao, « Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2010), No.1, 112-129.
- [62] «State of the art on dispersed PV power generation: publications review on the impact of PV Distributed Generation and Electricity networks», IEE PV Upscale, WP4-Deliverable 4.1, 2007.
- [63] Farhoodnea, M., A. Mohamed, H. Shareef, and H.Zayandehroodi, «An enhanced method for contribution assessment of utility and customer harmonic distortions in radial and weakly meshed distribution systems», International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 43 (2012), No.1, 222-229.
- [64]Masoud .F, Azah .M, Hussain. S, Hadi. Z, « Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks», Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 2a/2013.
- [65]F. Katiraei, K. Mauch, and L. Dignard-Bailey, « Integration of photovoltaic power systems in high-penetration clusters for distribution networks and mini-grids», National Resources Canada, January 2009.
-

- [66] Bedoud, K., et al. "Modélisation Statistique pour l'Evaluation de l'Energie Eolienne." 3ème Conférence Internationale de Mécanique ICM'2017. 2017.
- [67] M. Jamil, R. Gupta, « A Review Of Power Converter Topology Used With PMSG Based Wind Power Generation », IEEE Fifth Power India Conference, (PIC 2012), pp. 01-06, 19-22 Décembre 2012, Murthal.
- [68] Derai, A., A. Kaabeche, and S. Diaf. "Etude de faisabilité technico-économique de fermes éoliennes en Algérie." *Revue des Energies Renouvelables* 20.4 (2017): 693-712.
- [69] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, X. Roboam, S. Astier, b. Dakyo, C. Nichita, « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », paru mai en 2002.
- [70] M. Jourieh, « développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien », Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [71] <https://www.connaissancedesénergies.org/fiche-pedagogique/énergie-éolienne>.
- [72] N.Laverdure, D. Roye, S. bacha, R. Belhomme, « Technologie Des Systèmes Eoliens- Intégration Dans Les Réseaux Electriques », *La Revue 3EI*, No.39, 2004.
- [73] N. Laverdure, « Sur L'intégration Des Générateurs Eoliens Dans Les Réseaux Faibles Ou Insulaires », Thèse De Doctorat En Génie Electrique, Institut National Polytechnique De Grenoble, France, 2005.
- [74] documentation GE Wind : www.gepower.com.
- [75] Rouabhi, Riyadh, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », Thèse de Doctorat. Université de Batna 2, 2016.
- [76] A. Boyette, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [77] Khaireddine, Allali, « Modélisation et analyse de l'intégration d'un jumelage Éolien-Diesel dans un réseau électrique autonome », Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [78] D. Mida, « Contribution à la modélisation d'un système de production d'énergie électrique hybride « Eolien – Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [79] S. Elaimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrales dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
-

- [80] G.CUNTY, « Éoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aix-en-Provence, 2001, www.edisud.com.
- [81] ALLAM, Mohamed, et al, «Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable», Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [82] KHETTACHE, Laid, «Contribution à l'Amélioration des Performances Des Systèmes Eoliens», Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.2019.
- [83] Historiquedeséoliennes <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergisRenouvelables/index.htm>.
- [84] Hau, Erich, and Wind-Turbines Fundamentals. "Technologies, Application." Economics, Springer (2000).
- [85] Fateh, Louar, et al. "Modeling and control of a permanent magnet synchronous generator dedicated to standalone wind energy conversion system." *Frontiers in Energy* 10.2 (2016): 155-163.
- [86] MULTON, Bernard, GERGAUD, Olivier, AHMED, Hamid Ben, et al. *Etat de l'art des aérogénérateurs*. 2002.
- [87] MAKANGA KOUMBA, Paul, «Contribution à l'étude et à la commande des éoliennes à génératrices synchrones dédiées aux réseaux électriques autonomes», Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières. 2019
- [88] O. Gergaud, « Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur », Thèse De Doctorat De L'école Normale Supérieure De Cachan, 2002.
- [89] Boyette, Armand, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2006.
- [90] Frédéric 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 de l'Université de Nantes 2003
- [91] Hau, Erich. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [92] ERIKSEN, Peter Borre, ACKERMANN, Thomas, ABILDGAARD, Hans, et al. System operation with high wind penetration. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2005, vol. 3, no 6, p. 65-74.
- [93] Minh Huynh Quang, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de Doctorat, l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012.
-

- [94] Guediri, Abdel Karim, « Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [95] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [96] Lecocq. D, Lataire. P.H, "Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages", *Controllable Proc. EPE*, pp. 337-339, Firenze, 1991.
- [97] WWEA, « Rapport mondial sur l'énergie éolienne 2008 », Fév. 2009, Allemagne.
- [98]. L.Merad, B.Benyoucef Et Jean Pierre Charles, « Etude technico-economique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité (18) Afrique science 02(2) (2006) 187 – 197 Issn 1813-548x Mai 2006.
- [99] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, « Robust output feedback control of a doubly fed induction machine », *Proc. IEEE international symposium on industrial electronics ISIE'99* (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.
- [100] Wu, Zhenwei, « Conception optimale d'un entraînement électrique pour la chaîne de traction d'un véhicule hybride électrique: Co-conception des machines électriques, des convertisseurs de puissance et du réducteur planétaire », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 2012.
- [101] Haritza Camblong , « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [102] Techniques de l'Ingénieur, « Convertisseurs et machines électriques », D 3 960.
- [103] Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, « PM Wind Generator Topologies », *IEEE Transaction on industry application*, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.
- [104] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, « A survey on variable-speed wind turbine system », Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.
- [105] Makanga Koumba, Paul, « Contribution à l'étude et à la commande des éoliennes à génératrices synchrones dédiées aux réseaux électriques autonomes. », Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2019.
- [106] F. Sahin, « Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine », Thèse de Doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001.
-

- [107] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [108] M. Kassa Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de Doctorat, Université de Béjaia-Abderrahmane Mira, 2010.
- [109] A. Schmidhofer, H. Weiss, « Optimisation of power electronics for small stand alone wind power stations », 10th European conference on power electronics and applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.
- [110] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [111] L. Leclercq, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [112] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2008.
- [113] Stefan Marko, Ivan Darul'a, « Large scale integration of renewable electricity production into the grids », Journal of Electrical Engg, vol. 58, no.1 pp.58–60, 2007.
- [114] Inigo Martinez de Alegriaa, Jon Andreua, Jose Luis Martina, Pedro Iban ezb, Jose Luis Villateb, Haritza Camblongc, « Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.11, no.6, pp.1858–1872, 2007.
- [115] S.K. Khadem, M. Basu, M.F. Conlon, « Power quality in grid connected renewable energy systems: role of custom power devices », International conference on renewable energies and power quality, Spain, vol.III, pp.23-25 March 2010.
- [116] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, France, juillet 2010.
- [117] GAILLARD, Arnaud, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
-

- [118] AYOUB, Tarik, «Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation, » Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 2013.
- [119] A.tamaarat, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de MADA», Thèse de Doctorat, Université de Mohammed khider-Biskra, 2015.
- [120]AZZOUZ, « Tamaarat. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA», Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra. 2015.
- [121] C. Bourillon, «Wind energy – Clean power for generations», Renewable energy, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [122] MAZOUZ, Lakhdar, «Etude et analyse d'un système HVDC-VSC connecté à une ferme d'énergie éolienne», Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbes, 2018.
- [123] Vechhiu, Ionel, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de Doctorat, Laboratoire Du groupe de recherche en électrotechnique et automatique du Havre, 2005.
- [124] M. Dali, «Commande et gestion énergétique des systèmes hybrides photovoltaïque - éolien», Thèse de Doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunisie, 2009.
- [125] Dhaker Abbes, « Contribution au dimensionnement et a l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome», Thèse de Doctorat, Université De Poitiers, 2012.
- [126]Madaci Bouthaina, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour lesmultisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs», Thèse de Doctorat 3èmecycle, Université Des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [127].S.Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université De Toulouse, 2009.
- [128] M. Belhamel, S. Moussa Et A. Kaabache, « Production d'électricité au moyen d'un système hybride (eolien-photovoltaïque-diésel) », Revue des énergies renouvelables, Zones Arides, 2002, Pp-49-54.
- [129] Ionel Vechui, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat de L'université du Havre, Soutenue Le 15 Décembre 2005.
- [130] Benlahbib, Boualam, « Supervision d'un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique», Thèse de Doctorat ,2019.
-

- [131] Mohamed Mladjao Mouhammad Al Anfaf, « Contribution a la modélisation et a l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2016.
- [132] A. Keyhani, M. N. Marwali Et M. Dai, « Integration of green and renewable energy in electric power systems », Hoboken, New Jersey, Usa: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [133] Berrazouane Sofiane, « Modeling, simulation and supervision of multi-source hybrid system for electricity production in remote areas », Thèse de Doctorat, Département de maintenance, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2014.
- [134] Prabodh Bajpai And Vaishalee Dash, « Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications a review », Renewable And Sustainable Energy Reviews, Vol.16, Pp.2926 -2939, 2012.
- [135] Kashe Kaviani A., Riahy G.H. And Kouhsari S.H.M, « Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/pv generating system, considering component outages », Journal of renewable energy, Vol.34, Pp.2380 - 2390, 2009.
- [136] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems », Solar energy materials & solar cells, Vol: 90, N°: 11, Pp: 1555 –1578, 2006.
- [137] Adel Soualmia and Rachid Chenni “Comparative Study of Three Algorithms (MPPT) Applied to Photovoltaic Systems” International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 26 No. 4 Jul. 2019, pp. 1147-1158, © 2019 Innovative Space of Scientific Research Journals, <http://www.ijias.issr-journals.org/>
- [138] Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen, « Implementation of a dsp-controlled pv system with peak power tracking », IEEE trans. industrial electronics, Vol: 45, N°: 1, Pp: 99–107, 1998.
- [139] Al-Diab, Ahmad, and Constantinos Sourkounis. "Variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems." *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*. IEEE, 2010.
- [140] Rezk, Hegazy, and Ali M. Eltamaly. "A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems." *Solar energy* 112 (2015): 1-11.
- [141] M. Rifai & RatnaIka P.Pemodel and An Analisis Panel Photovoltaik, Conference Informatics, Telecommunications Electrical Engineering. UGM Yogyakarta, 2012.
- [142] Balamurugan, T., and S. Manoharan. "Fuzzy controller design using soft switching boost converter for MPPT in hybrid system." *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2.5 (2012): 87-94.
-

- [143] Xuesong, Zhou, et al. "The simulation and design for MPPT of PV system based on incremental conductance method." *information engineering (ICIE), 2010 WASE international conference on*. Vol. 2. IEEE, 2010.
- [144] Vinodhkumar, G., and M. Sasikumar. "Performance enhancement in pv system using intelligent controller based mppt controller." *IOSR Journal of Engineering* 2.2 (2012): 284-287.
- [145] LIN, Whei-Min, HONG, Chih-Ming, CHENG, Fu-Sheng, et al. MPPT control strategy for wind energy conversion system based on RBF network. In : IEEE 2011 EnergyTech. IEEE, 2011. p. 1-6.
- [146] Heydari, M., and Smedley, K. (2015), « Comparison of maximum power point tracking methods for medium to high power wind energy systems», in proceedings of 2015 20th conference on electrical power distribution networks conference (EPDC), Zahedan, 184–189.
- [147] Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y., and Lai, J. S. (2013), « Design and analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems», IEEE Trans. Energy Convers. 28, 756–767.
- [148] Raza, Kazmi Syed Muhammad, et al. "Maximum power point tracking control and voltage regulation of a DC grid-tied wind energy conversion system based on a novel permanent magnet reluctance generator." 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2007.
- [149] Nasiri, M., J. Milimonfared, and S. H. Fathi. "Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines." *Energy Conversion and Management* 86 (2014): 892-900.
- [150] Balasundar, C., S. Sudharshanan, and R. Elakkiyavendan. "Design of an optimal tip speed ratio control MPPT algorithm for standalone WECS." *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol* 3 (2015): 442-450.
- [151] Ayushi Sachan, Akhilesh Kumar Gupta and Paulson Samuel, « A review of mppt algorithms employed in wind energy conversion systems », Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad, India, 2017.
- [152] Koutroulis, E. and Kalaitzakis, K. (2006), « Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications », IEEE Trans. Ind. Electron. 53, 486–494.
- [153] Liu, C., Chau, K. T., and Zhang, X. (2010), « An efficient wind–photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine », IEEE Trans. Ind. Electron., 57, 831–839.
-

- [154] Kazmi, S. M. R., Goto, H., Hai-Jiao, G., and Ichinokura, O. (2011) , « A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems »,IEEE Trans. Ind. Electron. 58, 29–36.
- [155] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., and Vitelli, M. (2005), « Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method », IEEE trans. power electron. 20, 963–973.
- [156] Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y and Lai, J. S. (2013), « Design and Analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems I», EEE Trans. Energy convers. 28, 3.
- [157] Xia, Y., Ahmed, K. H., Williams, B. W. (2011)A new, « maximum power point tracking technique for permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system», IEEE trans power electron. 26, 3609–3620.
- [158] Petrila, D., Blaabjerg, F., Muntean, N., and Lascu, C. (2012) Fuzzy, « Logic based MPPT controller for a small wind turbine system », Proceedings of the 13th international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), Brasov, 993–999.
- [159] Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, Young-Man Cho, And Sung-Hoon Ahn, , « Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A review», International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, Vol.2, No.1, pp. 99-112,2015.
- [160] Ludmil Stoyanov, « Structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», revue de génie industriel, vol.5, pp.1-19,2010.
- [161] Egor. Gladkikh, « optimisation de l'architecture des réseaux de distribution d'énergie électrique», Thèse de Doctorat, Université Grenoble ALPES spécialité génie électrique 2006.
- [162] « Compensation partielle et globale du réseau électrique BT à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque », A.Y. Kadri et A. Hamidat, 2009.
- [163] « Méthode d'une étude BT » document de SONALGAZ.
- [164] Pradeepa, Ha, et al. "Optimal allocation of combined DG and capacitor units for voltage stability enhancement." Procedia Technology 21 (2015): 216-223.
- [165]] Kadri, A. Y., and A. Hamidat, « Connecting Impact of the PV Mini-Power on voltage and load of LV network»,Third international conference on electrical engineering-icee. Vol. 9. 2009.
- [166] Berseneff, Boris, «Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur, Thèse de Doctorat. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2010.
-

[167] R.Caire, gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2004.

[168] [www .hydroquebec. com/ affaires/service-a-la-clientele/gualite-de-londe](http://www.hydroquebec.com/affaires/service-a-la-clientele/gualite-de-londe).
