

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Etude de l'intégration de l'éolien dans les
réseaux électriques**

Devant le jury composé de :

Mr. Aouamer Mesbah	Président
Mr. Touati Ibrahim Amar	Examineur
Mr. Jekhrab Ala Eddine	Examineur
Mr. Zobeidi Messaoud	Encadreur

Présenté par :

- SAYAH Ahmida
- ROUAS ALI
- KUIDRI KHALED
- TRILLI YUCEF

2021/2022

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

*Au nom de dieu le clément, le
miséricordieux*

*In the Name of Allah the Merciful, the
Compassionate*

Remerciements

Avant, toute personne, nous tenons à remercier notre Dieu Tout Puissant pour nous a avoir éclaircit le chemin de ce travail.

*Nos vifs remerciements vont également à Monsieur **ZOBEIDI MESSAOUD** professeur à l'université d'el oued d'avoir assuré l'encadrement de cette thèse ainsi que pour ses précieux conseils et la confiance qu'il nous a accordée qui ont fortement contribué à mener à bien ce travail. Nous tenons à remercier vivement Monsieur **Aouamer Mesbah** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.*

*Nous tenons à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **Jekhrab ala eddine** pour avoir bien voulu juger le travail.*

*Nous tenons à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **Touati Ibrahim Amar** d'avoir accepté d'examiner mon travail. Enfin, Un grand merci s'adresse à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.*

Table des matières

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
INTRODUCTION GENERALE	1
I.GENERALITE SUR LES SOURCES D'ENERGIES RENOUVELABLES	3
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 CONTEXTE ACTUEL.....	3
I.2.1 <i>Energies dans le monde</i>	3
I.2.2 <i>Energies fossiles et impacts environnementaux</i>	3
I.2.3 <i>Le passage de l'ère du pétrole au post pétrole</i>	5
I.3 DEFINITION DES ENERGIES RENOUVELABLES.	6
I.4 LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIES RENOUVELABLES.....	7
I.4.1 <i>L'énergie solaire</i>	7
I.4.2 <i>L'énergie éolienne</i>	9
I.4.3 <i>L'énergie hydraulique</i>	9
I.4.4 <i>L'énergie de géothermie</i>	9
I.4.5 <i>L'énergie de biogaz</i>	10
I.4.6 <i>L'énergie de biomasse</i>	10
I.4.7 <i>L'énergie marémotrice</i>	11
I.5 HISTORIQUE ET ETAT DES LIEUX DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE EN ALGERIE	11
I.5.1 <i>Genèse du Programme National de Développement des Energies Renouvelables (PNEREE) de 2011</i>	12
I.5.2 <i>Version réactualisée en 2015 du PNEREE</i>	14
I.5.3 <i>Programme National de Transition Energétique 2020</i>	16
I.5.4 <i>Autres actions recensées par le Commissariat (CEREFÉ)</i>	18
I.6 CONCLUSION.....	22
II.L'ENERGIE EOLIENNE	23
II.1 INTRODUCTION.....	23
II.2 CARACTERISATION DES EOLIENNES	23
II.2.1 <i>Histoire des éoliennes</i>	23
II.2.2 <i>Descriptif d'une éolienne</i>	24
II.2.3 <i>Les différents types d'éoliennes</i>	25
II.2.4 <i>Principaux composants d'une éolienne</i>	27
II.3 SYSTEME DE REGULATION ET DE PROTECTION DE L'EOLIENNE	30
II.3.1 <i>Système de freinage automatique</i>	31
II.4 LES GENERATRICES D'EOLIENNES A VITESSE VARIABLE.....	33
II.4.1 <i>Eolienne à vitesse fixe</i>	33
II.4.2 <i>Eolienne à vitesse variable</i>	33
II.4.3 <i>Système utilisant une génératrice synchrone</i>	34
II.4.4 <i>Système utilisant une génératrice asynchrone</i>	35
II.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE :	37
II.5.1 <i>Les Avantages :</i>	37
II.5.2 <i>Les inconvénients :</i>	38
II.6 CONCLUSION.....	39
III.INTEGRATION DE L'EOLIENNE DANS UN RESEAU ELECTRIQUE	40
III.1 INTRODUCTION.....	40
III.2 TECHNIQUE DE RACCORDEMENT	40

<i>III.2.1 Connexion au réseau</i>	40
<i>III.2.2 Tension de raccordement</i>	41
<i>III.2.3 La capacité d'accueil des réseaux</i>	41
<i>III.2.4 Types de raccordement</i>	41
III.3 LES IMPACTS DE L'INTEGRATION D'UN SYSTEME EOLIEN DANS LE RESEAU	42
<i>III.3.1 Impacts Locaux</i>	42
<i>III.3.2 Impact globaux</i>	42
III.4 SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	43
III.5 CONCEPTION ET SIMULATION DE SYSTEME D'ENERGIE EOLIENNE	44
<i>III.5.1 Explication du modèle</i>	44
III.6 PARAMETRES UTILISES DANS LES BLOCS	46
III.7 LES RESULTATS DES SIMULATIONS ET INTERPRETATION	48
<i>III.7.1 Caractéristiques de l'énergie éolienne</i>	48
III.8 L'ETAT DE RESEAU AVANT ET APRES L'INTEGRATION D'EOLIENNE	52
<i>III.8.1 La différence de valeur de PU volt avant et après l'énergie éolienne est intégrée au réseau électrique</i>	54
<i>III.8.2 La différence de valeur de perte en MW loss avant et après l' intégrée au réseau électrique</i>	55
<i>III.8.3 La différence de valeur de la perte de Mvar avant et après l' intégrée au réseau électrique</i> ..	56
III.9 CONCLUSION.....	56

Liste des figures

FIGURE I.1 SCHÉMA EXPLICATIF DE L'EFFET DE SERRE.....	4
FIGURE I.2 CONCENTRATION DE CO ₂ À L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE.	4
FIGURE I.3 LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE TOTALE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ 2020.....	7
FIGURE I.4 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.	8
FIGURE I.5 CHAUFFE EAU SOLAIRE.	8
FIGURE I.6 TOUR SOLAIRE.	9
FIGURE I.7 EOLIENNE.	9
FIGURE I.8 HYDRAULIQUE.	9
FIGURE I.9 CENTRALE GÉOTHERMIQUE DE NESJAVELLIR EN ISLANDE.	10
FIGURE I.10 LE PRINCIPE DU BIOGAZ.	10
FIGURE I.11 LE PRINCIPE DE LA BIOMASSE.	11
FIGURE I.12 LE PRINCIPE DE LA MAREMOTRICE.	11
FIGURE I.13 ÉVOLUTION ESTIMÉE DU PARC NATIONAL DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ.....	13
FIGURE I.14 ÉVOLUTION DES COÛTS DE PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ À BASE DES PRINCIPALES RESSOURCES RENOUVELABLES.	15
FIGURE I.15 GISEMENT SOLAIRE DE L'ALGERIE.....	19
FIGURE I.16 GISEMENT EOLIEN DE L'ALGERIE.....	21
FIGURE II.1 EOLIENNE DE POMPAGE D'EAU ANCIENNE.	24
FIGURE II.2 CONVERSION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DU VENT.	25
FIGURE II.3 EXEMPLES DE TURBINES EOLIENNES A AXE VERTICAL.	26
FIGURE II.4 COMPOSANTS D'UNE TURBINE EOLIENNE.	28
FIGURE II.5 MODELES DE MATS D'EOLIENNES A AXE HORIZONTAL ; A) MAT AUTOPORTEUR, B) MAT EN TREILLIS, C) MAT HAUBANE.....	28
FIGURE II.6 EOLIENNE VITESSE FIXE.	34
FIGURE II.7 EOLIENNE VITESSE VARIABLE.	34
FIGURE II.8 EOLIENNE UTILISANT UNE GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (GADA).....	37
FIGURE III.1 ILLUSTRATION DES CONFIGURATIONS DE RACCORDEMENT (A) EN DEPART MIXTE (B) EN DEPART DIRECT.	41
FIGURE III.2 LE MODELE D'INTEGRATION D'EOLIENNE DANS UN RESEAU ELECTRIQUE.	44
FIGURE III.3 ALIMENTATION EN TENSION TRIPHASEE.	44
FIGURE III.4 TRANSFORMATEUR TRIPHASE.	45
FIGURE III.5 UNE BATTERIE DE CONDENSATEURS.	45
FIGURE III.6 L'ENTREE DE TROIS PHASES ET LA SORTIE DE L'EOLIENNE DANS LE MODELE DE TURBINE.	45
FIGURE III.7 LA PUISSANCE DE SORTIE A DIFFERENTES VITESSES DE VENT.....	48
FIGURE III.8 LES DIFFERENTS RESULTATS DE SIMULATION EFFECTUEE.	49
FIGURE III.9 LA VITESSE DU VENT (v).	49
FIGURE III.10 L'ÉVOLUTION DE LA VALEUR ROUTEUR ABSORBE PAR LE RESEAU ELECTRIQUE.....	50
FIGURE III.11 LA VARIATION DE TORSION (T _e) DU GENERATEUR EOLIEN.	50
FIGURE III.12 LE CHANGEMENT DE LA PUISSANCE (P) ACTIVE PRODUITE PAR LE GENERATEUR EOLIEN.	51
FIGURE III.13 LA VARIATION DE LA VITESSE DE ROUTEUR.....	51
FIGURE III.14 LE SIXIEME GRAPHE.	52
FIGURE III.15 RESEAU ELECTRIQUE AVANT L'INTEGRATION DE L'ÉNERGIE EOLIENNE.	52
FIGURE III.16 RESEAU ELECTRIQUE APRES INTEGRATION DE L'ÉNERGIE EOLIENNE.	53
FIGURE III.17 LA DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS DE LA PORTEE AVANT ET APRES L'INTEGRATION DE L'ÉOLIENNE.....	54

FIGURE III.18 L'HISTOGRAMME DE LA DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS DE PERTE DE (MW LOSS) AVANT ET APRES L'INTEGRATION 55

FIGURE III.19 L'HISTOGRAMME DE LA DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS DE PERTE DE (MVAR LOSS) AVANT ET APRES L'INTEGRATION 56

Liste des tableaux

TABLEAU I.1 PART DE CHACUNE DES RESSOURCES RENOUVELABLES PRIMAIRES RETENUES.	13
TABLEAU I.3 PLANNING DE REALISATION DU PROGRAMME (VERSION 2011).	13
TABLEAU I.4 PLAN D'EXECUTION DU PNEREE REVISE EN 2015 (EN MW).....	16
TABLEAU I.5 PRODUCTION DE PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES EN ALGERIE.	22
TABLEAU II.1 COMPARATIF ENTRE LA VITESSE FIXE ET LA VITESSE VARIABLE	34
TABLEAU II.2 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES GENERATRICES SYNCHRONES.	35
TABLEAU II.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES GENERATRICES ASYNCHRONES.....	36
TABLEAU II.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION.....	36
TABLEAU III.1 LA DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS DE PUISSANCE AVANT ET APRES L'INTEGRATION D' EOLIENNE.	53
TABLEAU III.2 LA DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS DE PERTE DE (MW LOSS) APRES L'INTEGRATION D'EOLIENNE.....	54
TABLEAU III.3 LA DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS DE PERTE DE (MVAR LOSS) APRES L'INTEGRATION DE L' EOLIENNE.	55

Introduction Générale

Dans les dernières décennies, le monde entier a connu une concurrence dans le développement économique et technique afin satisfaire les besoins de l'être humain. tous ces échanges conduisent forcément a une transition énergétique causé par l'augmentation de la demande de l'énergie électrique qui est primordiale pour tout développement et croissance mondiale, d'autre part, la production classique ou centralisé pose de plus en plus des défis de la pollution de la planète. De ce fait, les chercheurs dans ce domaine d'énergie lancent une thématique des recherches sous l'intituler « développement des énergies renouvelables » pour trouver des solutions énergétiques vertes et efficaces. Ce développement des énergies renouvelables s'est révélé d'être une solution attractive non polluante et disponible.

Afin de pour produire une énergie propre et durable, et l'état avancé de la recherche dans le domaine de l'énergie éolienne montre la volonté de développer des éoliennes plus puissantes et capables de mieux exploiter l'énergie disponible dans le vent, de nombreuses recherches sont actuellement en cours.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus utiles pour produire de l'électricité. Elle est considérée comme une alternative compétitive pour aider à réduire la demande croissante d'électricité. Les éoliennes installées en pleine mer appelées "offshore" sont l'une des structures les plus rentables à cause des vents plus forts, plus réguliers et moins encombrants que celles installées sur terre appelées "onshore".

Néanmoins, l'intégration à grande échelle des parcs éoliens pose aux réseaux d'énergie électrique de nouvelles contraintes par rapport aux sources d'énergies conventionnelles dont le comportement est bien maitrisé. Afin de relever le défi de coordination d'une production d'électricité basée sur l'exploitation de l'énergie éolienne avec le reste du système électrique, de nombreux pays ont imposé dans leur code de réseau de nouvelles exigences relatives au raccordement et au fonctionnement des aérogénérateurs et parcs éoliens. L'objectif des codes de réseau est de fixer des règles techniques de raccordement au réseau de transport de l'électricité, de conduite et de fonctionnement du système électrique.

L'objectif principal de notre travail est de continuer et améliorer la recherche dans le cadre de la production de l'énergie éolienne ainsi que de développer des méthodes pour surmonter les défis rencontrés lors de l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques afin de promouvoir l'efficacité et le rendement de la solution éolienne comme une alternative prometteuses et durable.

Ce travail est reparti comme suit :

- Afin de placer notre système en étude, une généralité sur les différentes structure, élément et notion seront décrites dans le premier chapitre, nous allons abordé la notion d'énergies renouvelables et leurs différents types. L'histoire et de l'état des énergies renouvelables notamment en Algérie.

- Dans ce chapitre, nous allons discuter l'énergie éolienne, surtout la description, les types et les principaux composants des éoliennes. Ensuite, le système de protection et de régulation des éoliennes à freinage manuel et le second à freinage automatique. Enfin, nous allons évoquer leurs avantages et inconvénients.

- Le troisième chapitre sera dédié à la présentation des différentes stratégies de raccordement des éoliennes dans les réseaux électriques ainsi l'impact de l'intégration, suivi par les simulations effectuées sur le modèle propose sur le simulateur MATLAB/Simulink les résultats obtenus seront analysés et interprétés.

On terminera le travail par une conclusion générale qui résume les objectifs à atteindre à travers cette étude et quelque perspective seront proposée pour les prochains travaux

Chapitre I

Généralité sur Les sources d'énergies renouvelables

I. Généralité sur Les sources d'énergies renouvelables

I.1 Introduction

Avec l'épuisement progressif des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, houille, etc.), les énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire, biomasse...) se développent de plus en plus. Elles ont le double avantage d'utiliser des flux inépuisables d'énergie naturelle (soleil, vent, eau, bois, etc.) et de ne pas, ou peu, nuire à l'environnement.

Ce type d'énergie ne couvre encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité. Nous notons que l'hydroélectricité existe depuis près d'un siècle et constitue environ 16% de la production mondiale d'électricité et représente 92,5% de l'électricité issue des énergies renouvelables (biomasse 5,5%, géothermie 1,5%, éolien 0,5% et le solaire 0,05%). [01]

I.2 Contexte actuel

I.2.1 Energies dans le monde

Débutant avec la révolution industrielle, le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère a commencé à s'accroître avec l'utilisation à grande échelle du pétrole comme source principale d'énergie. Au cours des dernières décennies, le rythme s'est accéléré avec l'industrialisation de nombreux pays. En effet, l'humanité consomme actuellement trente fois plus d'énergie qu'il y a un siècle [02].

Par ailleurs, l'utilisation de carburants d'origine fossile pose deux problèmes majeurs : celui du rejet de CO_2 dans l'atmosphère, qui est un gaz à effet de serre et celui du prélèvement de ressources non renouvelables, passible de l'épuisement. Ces deux problèmes représentent aujourd'hui des enjeux importants pour les gouvernements des pays industrialisés et pour des grands organismes internationaux.

I.2.2 Energies fossiles et impacts environnementaux

Le $XX^{\text{ème}}$ siècle a connu le plus grand réchauffement jamais enregistré depuis au moins un millénaire. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration dans l'atmosphère en CO_2 et des autres gaz dus à l'activité humaine. Même si certaines divergences existent, la communauté scientifique est d'accord sur le fait que l'aggravation de l'effet de serre dû à l'activité humaine joue un rôle de premier rang dans

les changements climatiques actuels. De plus, on s'attend à ce que les gaz à effet de serre et la température continuent à augmenter dans les années à venir [04].

1.2.2.1 Le mécanisme de l'effet de serre :

Même si actuellement l'effet de serre est associé au réchauffement climatique, il est initialement un phénomène naturel indispensable à la vie sur Terre. Cet effet de serre permet à l'atmosphère terrestre de se maintenir à une température moyenne de +15°C. Sans lui, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -18°C, toute l'eau serait de glace et il n'y aurait probablement pas de vie sur Terre [06].



Figure I.1 Schéma explicatif de l'effet de serre.

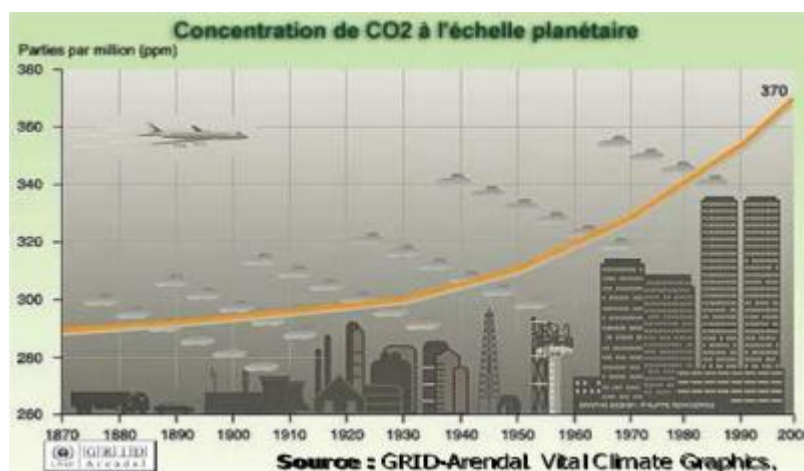


Figure I.2 Concentration de CO₂ à l'échelle planétaire.

Source : United Nations Environment Programme. GRID-Arendal. Vtal Climate Change Graphics 2005

La terre reçoit une grande quantité d'énergie du soleil. Elle absorbe une partie de cette énergie et se réchauffe réémettant ensuite de la chaleur par l'intermédiaire des rayons infrarouges. Sans les gaz dits « à effet de serre », qui interceptent une partie de ces infrarouges émis par la Terre, toute cette chaleur serait renvoyée dans l'espace.

Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, depuis la révolution industrielle, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée. Ainsi, la concentration en CO_2 , principal gaz à effet de serre, a augmenté d'environ 35% depuis l'ère préindustrielle 280ppm, atteignant maintenant 380ppm (pour l'année 2005).

Les trois quarts de CO_2 de ces dernières années sont dus la combustion fossile de charbon, de pétrole ou de gaz. Les effets combinés de tout gaz à effet de serre équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO_2 . Ce surplus artificiel d'effet de serre, appelé « l'effet de serre additionnel », retient dans l'atmosphère une plus grande quantité de rayonnement infrarouge provoquant un réchauffement du climat.

I.2.3 Le passage de l'ère du pétrole au post pétrole

Par leur nature, les ressources fossiles sont limitées et épuisables. Leur épuisement parviendra d'autant plus vite que la consommation est grande. La situation actuelle devient fortement préoccupante du fait de l'approche du pic de production avec une demande qui ne cesse de croître. En effet, le pétrole commencera à manquer lorsque la production ne pourra plus suivre la consommation **[07]**.

Ces considérations sur l'état de la production du pétrole imposent une diversification de la production d'énergie et un changement technologique majeur dans tous les domaines. Ainsi, un intérêt croissant est porté aux énergies renouvelables et nucléaires.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables.

I.3 Définition des Energies renouvelables

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [03], [04].

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural ou elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire [08].

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX^{ème} siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Dès lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles à y accéder. Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets.
- Elles sont inépuisables.
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

La production d'électricité renouvelable a atteint 3810.3 TWh en 2009, soit 19.1% de la production d'électricité mondiale.

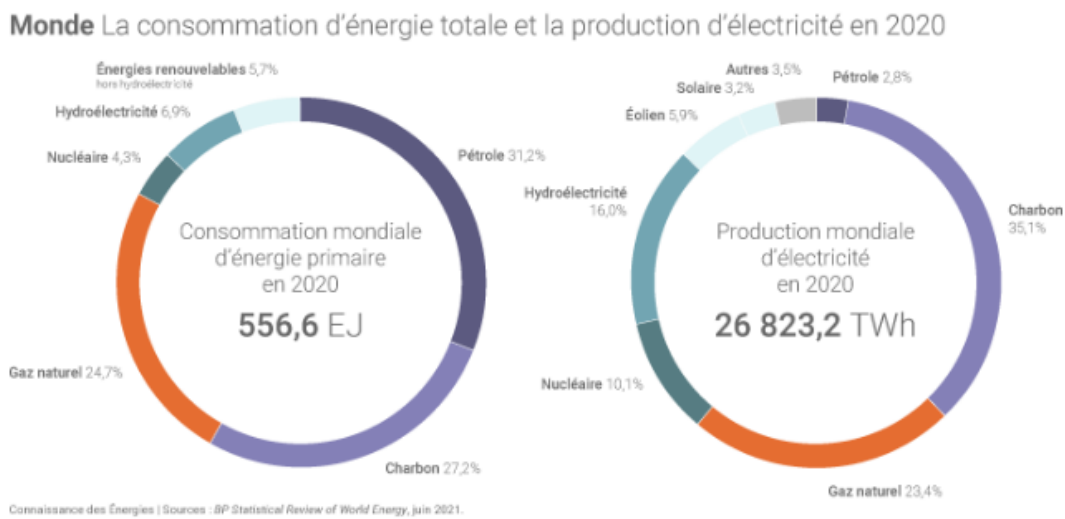


Figure I.3 La consommation d'énergie totale la production d'électricité 2020 [05].

I.4 Les différents types d'énergies renouvelables

I.4.1 L'énergie solaire

Transformation de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur à partir de panneaux ou de capteurs solaires. Le soleil, principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre. Il existe deux types.

a. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie [09].



Figure I.4 Module photovoltaïque.

b. L'énergie solaire thermique

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire photovoltaïque, elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie [10]. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe eau solaires » ou des « capteurs à air chaud ».

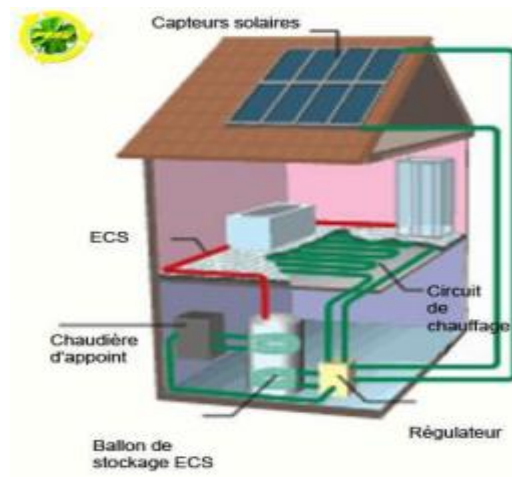


Figure I.5 Chauffe eau solaire.

c. L'énergie solaire thermodynamique

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur le principe de concentration des rayons solaires au moyen des miroirs galbés, en un foyer placé sur une tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple [12].



Figure I.6 Tour solaire.

I.4.2 L'énergie éolienne

C'est une énergie produite par le vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur ou un moulin à vent.



Figure I.7 Eolienne.

I.4.3 L'énergie hydraulique

Utilisant des cours d'eau pour produire d'électricité [11].



Figure I.8 Hydraulique.

I.4.4 L'énergie de géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol. La plus grande partie de la chaleur de la terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre.

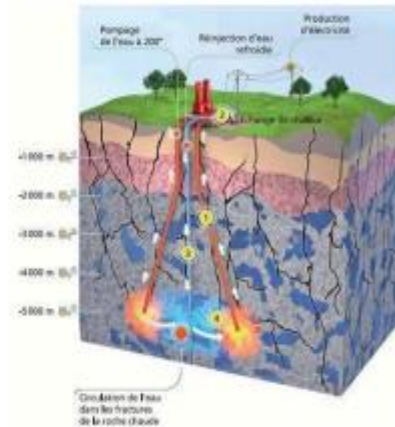


Figure I.9 Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande.

I.4.5 L'énergie de biogaz

Utilisation de l'énergie générée par la combustion du gaz méthane collecté et produit par les déchets organiques parvenant de l'agriculture et des décharges industrielles [06].

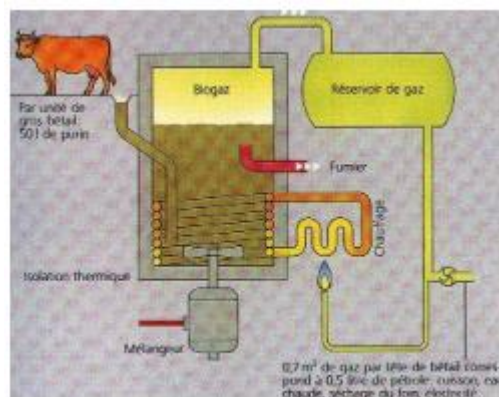


Figure I.10 Le principe du biogaz.

I.4.6 L'énergie de biomasse

Il s'agit d'énergie stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse, et exploitée par combustion (bois et autre biocarburants). Elle est considérée comme renouvelable si on admet que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites [12].

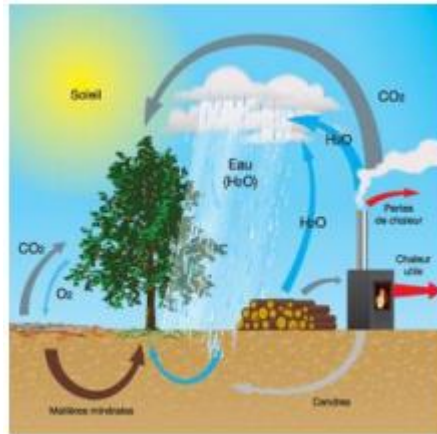


Figure I.11 Le principe de La biomasse.

I.4.7 L'énergie marémotrice

L'énergie des vagues (marée haute, marée basse), transformée en énergie électrique [05].



Figure I.12 Le principe de la marémotrice.

I.5 Historique et état des lieux des énergies renouvelables en Algérie

Hormis quelques actions isolées initiées au début en matière d'énergies renouvelables et efficacité énergétique, les deux secteurs n'ont commencé à se structurer de manière effective dans le pays qu'au milieu des années quatre-vingt du siècle dernier. Cela coïncide en fait avec la création des premières institutions publiques chargées de leur développement et suivi respectifs : soit le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) en 1988 et l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) en 1985 [06].

Depuis, plusieurs programmes sectoriels visant un déploiement assez limité de solutions énergétiques décentralisées, à base de ressources renouvelables en faveur des zones rurales enclavées, notamment dans les hauts plateaux et le sud du pays, ont été initiés avec un appui financier direct de l'état. A ce titre, il y a lieu de citer les programmes du Grand Sud dont celui du balisage solaire, entrepris par le CDER, ainsi que celui de l'électrification solaire autonome de 18 villages, réalisé par Sonelgaz (1998-2001) et qui a mobilisé une capacité globale de 344 KWc. Il en a été de même pour le volet de l'efficacité énergétique à travers des actions visant, entre autres, à limiter le gaspillage de l'énergie moyennant l'encouragement des solutions à base de ressources renouvelables telles que les chauffe-eaux solaires ou à efficacité énergétique prouvée comme les lampes basse consommation (LBC) pour l'éclairage électrique. Toutefois, le volume d'activité ainsi généré à travers la seule promotion des solutions autonomes (hors réseau) à base d'énergie solaire, reste marginal et non conforme aux tendances générales que reflètent toutes les statistiques liées au développement des énergies renouvelables à travers le monde. En effet et pour une multitude de raisons assez évidentes, notamment sur les plans technique et économique, il est aujourd'hui acquis qu'un développement massif des énergies renouvelables à l'échelle d'une région ou un pays, ne peut se concevoir sans le support d'un réseau électrique de dimension appropriée.

I.5.1 Genèse du Programme National de Développement des Energies Renouvelables

Le premier programme national dédié au développement et la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) en Algérie, a été adopté par le Gouvernement en date du 3 février 2011. Il ambitionnait un taux de 40 % de capacité de production d'électricité d'origine renouvelable à l'horizon 2030. Ceci étant sur la base d'une estimation de l'évolution de la puissance installée préalablement établie (Figure 13) et présentée par le Ministère de l'Energie et des Mines (MEM), qui a tablé sur une consommation annuelle globale à terme de 150 TWh/an. Quantitativement, l'objectif était d'assurer une capacité de production d'électricité renouvelable de 22000 MW, dont 10000 MW seraient dédiés à l'exportation.

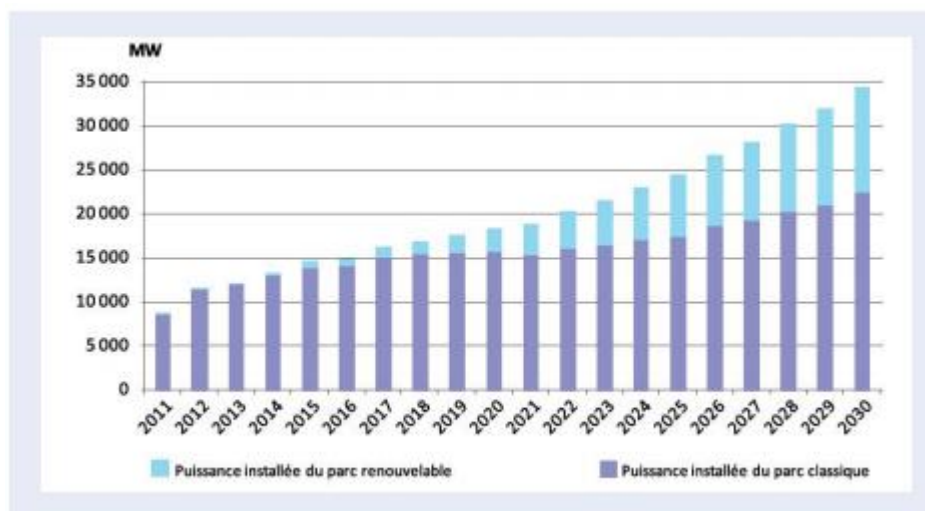


Figure I.13 Evolution estimée du parc national de production d'électricité.

1.5.1.1 Volet énergies renouvelables du PNEREE

Les moyens de production de l'électricité destinée au marché national (12GW), ont été planifiés selon le Ministère de l'Energie et des Mines (MEM) de l'époque, sur la base de trois principales ressources renouvelables (Tableau 1) et déployés selon quatre étapes (Tableau 2).

Tableau I.1 Part de chacune des ressources renouvelables primaires retenues.

Solaire thermique a concentration (CSP)	Solaire photovoltaïque (PV)	Eolien	Total
7200 MW	2800 MW	200 MW	12000 MW

Tableau I.2 Planning de réalisation du programme (Version 2011).

Etape	Action
2011-2013	Réalisation de projets pilotes totalisant une capacité de 110 MW pour tester les différentes technologies
2014-2015	Début de déploiement de programme avec une installation d'une puissance totale près de 650 MW
2016-2020	Déploiement a l'horizon 2020 d'une capacité minimale de 4600 MW sont destinés au marché intérieur et 2000 MW a l'exportation
2021-2030	Déploiement a grande échelle du programme en vue d'éteindre à l'horizon 2030 les objectifs respectifs de 12000 MW, prévue pour la consommation locale et 10000 MW à mettre sur le marché international.

Remarque : Le seuil de 20 000 MW pour la puissance installée du parc classique (principalement à base de gaz) prévu pour 2028 (Figure 13), a déjà été franchi en 2019 (20

963 MW selon Sonelgaz). Si on y ajoute les 8 000 MW qui vont être réceptionnés durant l'année en cours 2020, on serait au même niveau que le seuil prévu en 2028, parc renouvelable inclus.

1.5.1.2 Volet Efficacité énergétique du PNEREE

Le volet efficacité énergétique a été focalisé sur les secteurs de consommation qui ont été identifiés comme ayant un impact significatif sur la demande énergétique interne du pays qui sont suivants :

- Le bâtiment et résidentiel.
- Les transports
- L'industrie

1.5.2 Version réactualisée en 2015 du PNEREE

La réactualisation en 2015 de la première version du PNEREE, éditée en 2011, a été essentiellement motivée par les modifications notables dans le monde quant aux coûts d'investissement et de production d'électricité à base des diverses ressources renouvelables. En effet, il est à rappeler que c'est le solaire thermique à concentration (CSP) qui a été initialement adopté pour générer 7200 MW d'électricité solaire (Tableau 1), soit plus de 2.5 fois la part du solaire photovoltaïque (2800 MWc). Or, si en 2011 les coûts de production d'électricité à base de ces deux technologies étaient sensiblement les mêmes (0.35 dollars/KWh), ceux relatifs au solaire photovoltaïque ont par la suite fortement chuté jusqu'à moins de 0.15 dollars/KWh en 2015, alors que ceux du CSP n'ont que peu évolués et sont restés bien au-dessus de 0.25 dollars/KWh (Figure 14).

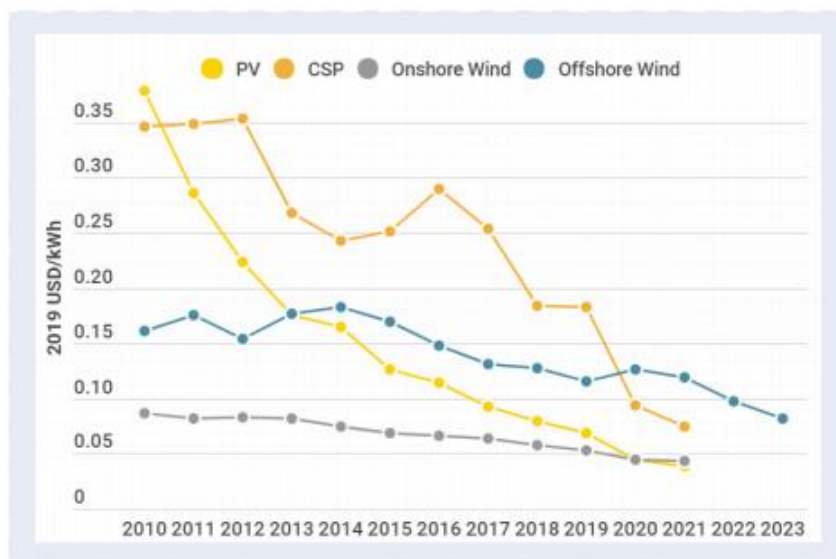


Figure I.14 Evolution des coûts de production de l'électricité à base des principales ressources renouvelables.

C'est ce constat qui a été à la base d'une révision en profondeur de la première version du programme malgré son lancement relativement récent. Ainsi, la part du CSP a été revue à la baisse (2000 MW au lieu de 7200 MW) tout en reportant son développement effectif au-delà de 2021, alors que celle du solaire photovoltaïque a été multipliée par 5 environ (13575 MW au lieu de 2800 MW), soit 62 % de l'ensemble des 22000 MW prévus à l'horizon 2030.

Mieux encore, plus de 4500 MW dont les 2/3 de solaire photovoltaïque, sont programmés pour être réalisés avant 2020 selon le planning porté dans le Tableau 3.

Cependant et avec le recul, on observe qu'à ce jour (2020), au même titre que la première version du programme, le planning tracé n'a été ni suivi ni même vu un début d'application quelconque. En effet, la seule activité visible sur le terrain dans le domaine des énergies renouvelables dans le pays depuis 2015, a essentiellement été dominée par la réception (étalée jusqu'en 2017) des centrales solaires photovoltaïques totalisant 343 MW du programme lancé en 2014 par SKTM. A côté de cela, Sonatrach, a mis en service en 2018 une première centrale solaire photovoltaïque de 10 MWc à Bir Rebaa Nord (BRN), wilaya de Ouargla et ce dans le cadre de sa stratégie SH 2030 qui vise à déployer une capacité totale de 2300 MW en énergie solaire à l'horizon 2030.

Tableau I.3 Plan d'exécution du PNEREE révisé en 2015 (en MW).

	1^{ère} Phase 2015-2020	2^{ème} Phase 2021-2030	Total
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	64	1000
Géothermie	05	10	15
Total	4525	17475	22000

I.5.3 Programme National de Transition Energétique 2020

La transition énergétique occupe une place importante dans le plan d'action du gouvernement qui se focalise sur « le triptyque d'un renouvellement économique basé sur la sécurité alimentaire, la transition énergétique et l'économie numérique ».

Le programme de transition énergétique vise, outre la diversification des sources énergétiques à travers le développement des énergies renouvelables, la promotion de l'efficacité énergétique en tant qu'action complémentaire de grande importance. Le pays ambitionne ainsi de s'affranchir de manière progressive de la dépendance vis-à-vis des ressources conventionnelles et amorcer une dynamique d'émergence d'une énergie verte et durable, disponible localement et en abondance comme le solaire. La démarche, s'articule en fait sur les considérations suivantes :

- La préservation des ressources fossiles et leur valorisation.
- Le changement du modèle énergétique de production et de consommation.
- Le développement durable et la protection de l'environnement.
- La maîtrise des coûts de réalisation des installations des énergies renouvelables.

1.5.3.1 Au titre du développement des énergies renouvelables

Un programme de développement des énergies renouvelables d'une capacité de 16.000 MW à l'horizon 2035 et ce, exclusivement à base de solaire photovoltaïque, a été soumis comme une des pièces maitresses de la transition énergétique en Algérie, selon le ministère de l'énergie. Ainsi, 15 000 MWc sont destinés à être produits exclusivement par des centrales solaires connectées au réseau électrique national, dont une première tranche de 4000 MWc est à réaliser à l'horizon 2024 alors que les 1000 MWc restant, sont à déployer en autonome à l'horizon 2030. C'est dans cette optique qu'un projet intitulé «

Tafouk I » visant la réalisation de 4000 MWc de solaire photovoltaïque a été présenté en Mai 2020, avec pratiquement un contenu identique à celui de capacité (4050 MWc) évoqué précédemment et qui n'a jamais eu de suite. Ce dernier a en effet été repris tel qu'il était, mais sans la composante industrielle et moyennant de légères modifications (huit lots de 500 MW au lieu de trois de 1350 MW précédemment), ainsi qu'une adaptation du volet financement selon la nouvelle restructuration de Sonelgaz qui a eu lieu entretemps.

En effet, c'est la nouvelle société de distribution, la SADEG en l'occurrence, née en 2017 du regroupement de l'ensemble des quatre anciennes filiales régionales (SDA, SDC, SDO et SDE), qui est appelée à représenter Sonelgaz dans son association avec Sonatrach pour le montage de la société destinée à prendre en charge le projet.

Sur un autre plan, l'hybridation des moyens de production d'électricité à base de ressources conventionnelles (diesel, gaz) au niveau du sud du pays avec le solaire photovoltaïque, a également été présentée comme étant une action prioritaire. Concernant le volet développement des énergies renouvelables en hors réseau (productions autonomes), le plan d'action du gouvernement comprend :

- La réalisation d'une capacité cumulée de 1000 MW à l'horizon 2030, dont la moitié avant 2024 et ce à l'aide de moyens de production autonomes mais sans aucune indication des moyens d'accompagnement en matière de stockage.
- Promouvoir la maîtrise locale de l'énergie.
- Renforcer le cadre réglementaire en incluant la certification obligatoire des installateurs, l'agrément des bureaux d'études impliqués et définir les mécanismes financiers aidant au développement des énergies renouvelables en hors réseau.

1.5.3.2 Au titre de la politique d'efficacité énergétique

Les mesures fortes que le gouvernement envisage de mettre en œuvre en matière d'efficacité énergétique, visent essentiellement une réduction drastique du gaspillage. Il a été préconisé d'encourager cette tendance, dont la mise en œuvre au niveau des différents secteurs d'activité, sera axée sur les mesures suivantes :

- La généralisation des procédés d'isolation thermiques dans les nouvelles constructions ;
- La mise en place d'un programme national pour la conversion des véhicules touristiques au GPLc et le développement du GNC pour ceux de transport collectif;
- L'équipement du réseau d'éclairage public et les divers édifices abritant les services administratifs nationaux avec des dispositifs à basse consommation ;
- La mise en place d'un cadre réglementaire prohibant l'importation et la production d'équipements énergivores ;
- L'élargissement du dispositif incitatif à l'investissement aux filières permettant la fabrication locale d'équipements et de composants dédiés à l'efficacité énergétique.

1.5.4 Autres actions recensées par le Commissariat (CEREFÉ)

Constatant le manque d'harmonie dans l'exécution des étapes initialement tracées quant à la mise en œuvre du PNEREE, notamment sa dernière version de 2015, ainsi que l'absence de suivi et d'évaluation de ce qui a été effectivement réalisé, le Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique (CEREFÉ) s'est fixé comme objectif, dès sa création, d'assainir les données en la matière. En effet, des questionnaires ont été adressés à l'ensemble des institutions nationales, impliquées de près ou de loin dans les activités liées au développement des énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique afin d'établir un état des lieux exhaustif de la situation et permettre ainsi de repartir sur de bonnes bases à l'avenir [28].

1.5.4.1 Consistance physique des principales réalisations recensées

Afin de donner un aperçu global aussi détaillé et précis que possible de l'ensemble des réalisations effectives relevant du domaine des énergies renouvelables en Algérie, notamment depuis le lancement du PNEREE en 2011, il y a lieu de distinguer celles connectées au réseau de celles qui ne le sont pas.

1.5.4.2 1ère édition de l'Atlas des Ressources Energétiques Renouvelables de l'Algérie

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) a publié en 2019 la première édition de l'Atlas des Ressources Energétiques Renouvelables de l'Algérie (Algerian Renewable Energy Resource Atlas). Ce dernier regroupe un ensemble d'illustrations cartographiques qui mettent en avant la richesse de l'Algérie en matière de

gisements énergétiques solaire, éolien, géothermique et bioénergie. La connaissance approfondie d'un tel potentiel énergétique renouvelable, constitue en fait un support d'étude rigoureux quant à l'élaboration et la mise en œuvre d'un programme de développement d'installations solaires, éoliennes ou toute autre ressource durable dans le pays [33]. A titre d'exemple, on donne ci-après un aperçu sur le travail accompli en matière d'évaluation des gisements solaires et éolien dans le pays, autour desquels s'articulent près de 85% des capacités de production d'électricité renouvelable visée dans le cadre du PNEREE (Tableau 3).

1.5.4.3 *Gisement solaire en Algérie*

L'Algérie, compte tenu de sa position géographique, dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre 3900 heures notamment dans les hauts plateaux et le Sahara.

Ainsi, sur l'ensemble du territoire national, l'énergie solaire globale reçue par jour sur une surface horizontale d'un mètre carré varie entre 5.1 KWh au Nord et 6,6 KWh dans le Grand Sud (Figure 15-a).

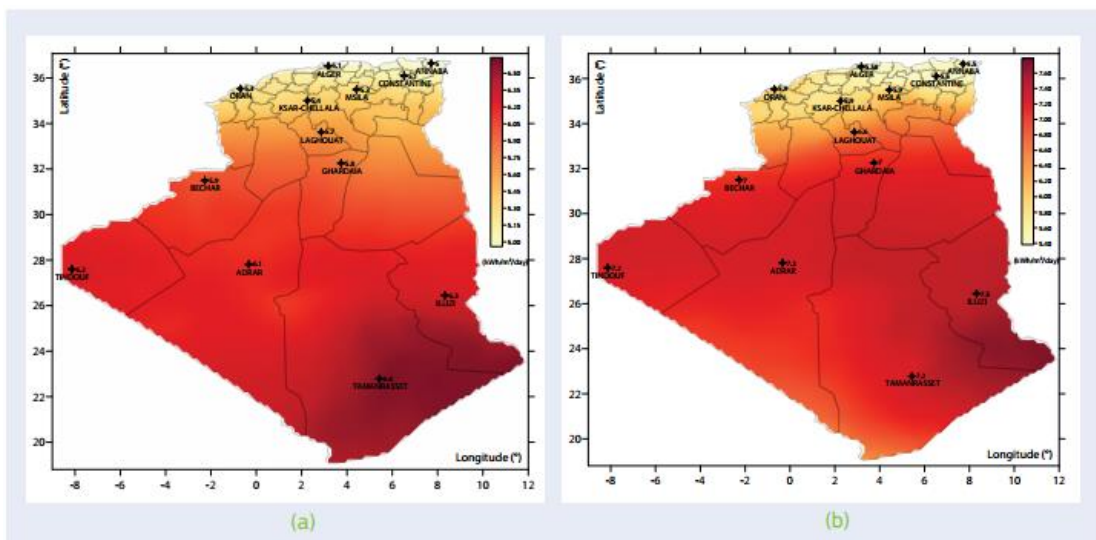


Figure I.15 Gisement solaire de l'Algérie.

(a) Energie solaire globale (ou GHI : Global Horizontal Irradiance) reçue par jour sur une surface d'un m² ; (b) Rayonnement solaire direct (ou DNI : Direct Normal Irradiance) reçu par jour sur une surface d'un mètre carré.

Quant à la radiation solaire incidente provenant du disque solaire et atteignant directement la surface terrestre, sans avoir été dispersée par l'atmosphère, qui reste une donnée de base pour le solaire thermique à concentration (CSP), elle peut atteindre 5.5 KWh (Alger) jusqu'à 7.5 KWh (Illizi) par jour et par mètre carré (Figure15-b).

1.5.4.4 Gisement éolien en Algérie

La connaissance approfondie du potentiel éolien susceptible d'être exploité pour la production d'électricité, constitue une donnée essentielle pour tout dimensionnement d'une ferme éolienne et reste de ce point de vue, incontournable pour toute étude préliminaire dans ce sens.

Le vent étant caractérisé par une variabilité temporelle et spatiale, différentes méthodes statistiques et techniques d'extrapolation des données sont appliquées pour l'étude du gisement éolien et l'établissement de l'atlas. Dans cette optique, le CDER a développé plusieurs cartes éoliennes de l'Algérie, qui sont continuellement mises à jour, en utilisant des données météorologiques récentes, collectées à travers un grand nombre de points de mesure. La (Figure 16-a), extraite de l'atlas éolien en question, représente ainsi la distribution de la vitesse moyenne (m/s) du vent sur le territoire algérien à 80 m de hauteur. Il y apparaît que celle-ci peut atteindre 7 à 8 m/s dans certaines régions du Sud, notamment à Tindouf, Adrar et Ain Salah.

Pour une évaluation optimale de la ressource éolienne disponible sur un site donné, il est nécessaire de calculer la densité de puissance moyenne (W/m^2) du vent qui indique l'énergie disponible après conversion en électricité à la sortie d'un aérogénérateur. Partant du fait qu'un site est dit éligible à l'installation d'un parc éolien rentable s'il présente une densité de puissance comprise entre 300 et 400 W/m^2 à 50 m de hauteur, la carte présentée (Figure 16-b) permet ainsi de bien situer les régions du pays favorables au développement de l'éolien [33].

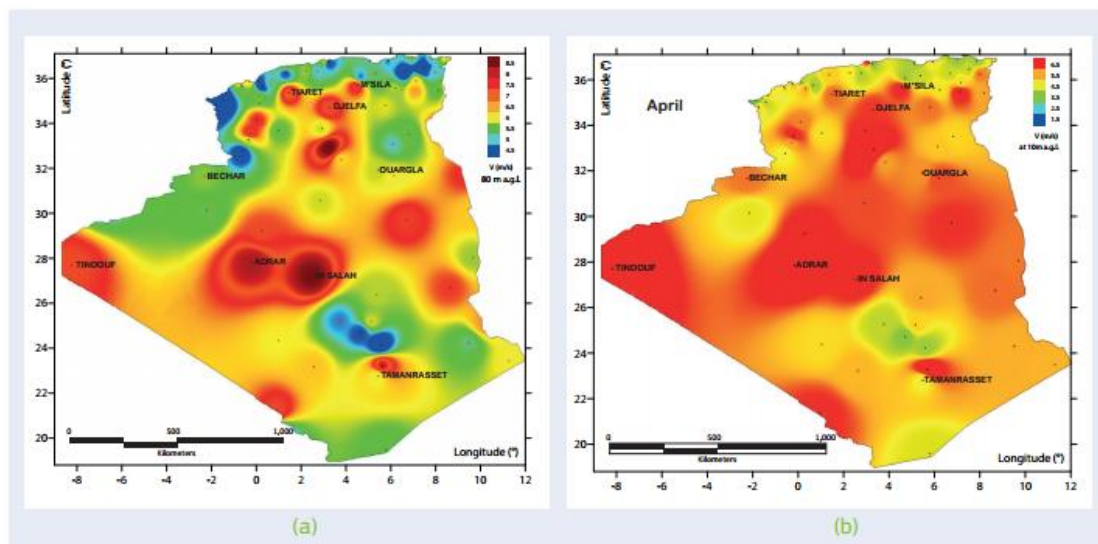


Figure I.16 Gisement éolien de l'Algérie.

- (a) Distribution de la vitesse moyenne (m/s) du vent sur le territoire Algérien à 80 m de hauteur,
 (b) Densité de puissance du vent sur le territoire à 80 m de hauteur [28].

Il convient de noter que le Ministère de l'Énergie a également réalisé plusieurs études de potentiel (solaire et éolien) en collaboration avec le CDER, l'Office National de la Météorologie (ONM) et l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL).

1.5.4.5 Industrie Nationale des Energies Renouvelables

En réponses aux questionnaires du Commissariat, le Cluster Energie Solaire (CES) a élaboré un rapport portant sur l'implication des entreprises qui lui sont affiliées quant au développement industriel du domaine en Algérie (Tableau 4).

Deux autres projets totalisant une capacité de production de 260 MWc dont le premier de MILLTECH (100 MWc) est prévu dans la wilaya de Mila pour rentrer en production vers avril 2020, alors que le second (160 MWc), localisé dans la wilaya de Ouargla, est à l'initiative de l'entreprise ZERGOUN GREEN ENERGY. La capacité de production annuelle de panneaux solaires photovoltaïques dans le pays serait ainsi de 450 MW et se résume à l'assemblage de kits importés de l'étranger, principalement de Chine, selon le dispositif CKD régi par l'article 37 de la Loi de finances 2019.

D'autres acteurs industriels actifs dans le pays, sont également impliqués dans la production d'accessoires et équipements (BOS : Balance of System) utilisés dans les

installations solaires tels que les structures métalliques avec une capacité de 25.400 Tonnes/an (toutes sections confondues), ainsi que les cellules Moyenne Tension (MT) avec 5000 Unités/an. Quant aux services, il y a lieu de noter la présence de quelques entreprises d'installation pouvant assurer la fourniture et la pose de systèmes PV de faibles puissances pour la génération d'électricité, le pompage solaire.

Tableau I.4 Production de panneaux solaires photovoltaïques en Algérie.

Fabrication de panneaux PV	ALPV	AURES SOLAIRE	CONDOR ELECTRONICS	ENIE ELECTRONICS	Total
Capacité de production annuelle (MWc)	12	30	130	18	190
Capacité produite (MWc)	-	18.9	15	-	33.9
Lieu de production	Tlemcen	Ain yagout Batna	Bordj Bou Arreridj	Sidi Bel Abbes	

Enfin, concernant le volet développement, certains bureaux d'études sont également actifs dans le pays, en proposant divers services dans le domaine tels que l'étude de faisabilité de projets solaires, la supervision, le conseil, l'assistance technique, l'exploitation, la maintenance, les audits, les expertises et l'ingénierie (modèle EPC).

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les énergies renouvelables, en commençant par une introduction, suivie du contexte actuel dans lequel nous discutons des énergies dans le monde, des énergies fossiles et des impacts environnementaux et sur la transition de l'ère pétrolière à l'ère post-pétrole. Ensuite, nous avons défini les énergies renouvelables et parlé brièvement de leurs différents types. Enfin, nous avons discuté en Algérie de l'histoire et de l'état des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

Chapitre II

L'énergie Eolienne

II. L'énergie éolienne

II.1 Introduction

Le vent est une source d'énergie renouvelable, économique, exploitable avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement. Dans le monde entier, les ressources d'énergie éolienne sont pratiquement illimitées. Les récents développements technologiques dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, en électronique de puissance et en commande de machines électriques tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile [07, 08].

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [07]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [09].

II.2 Caractérisation des éoliennes

II.2.1 Histoire des éoliennes [09]

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent. Apparus à l'an 600 tout d'abord en Orient puis en Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à moudre les grains mais aussi à pomper l'eau pour irriguer les cultures (figure II.1).

Les moulins à vent sont apparus en Europe un peu avant l'an 1000 en Grande-Bretagne et se sont généralisés ensuite au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite.

Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le Danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XX^{ème} siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse.

Pendant tout le XX^{ème} siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, Johannes Juul crée une turbine qu'il appellera Gedser et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1000 kW.



Figure II.1 Eolienne de pompage d'eau ancienne.

II.2.2 Descriptif d'une éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle tire son nom d'Éole (en grec ancien Αἴολος, Aiolos), le maître des vents dans la Grèce antique [10].

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières [10] :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de

Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;

- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...);
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors 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) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Un aérogénérateur, plus communément 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 (figure II.2).

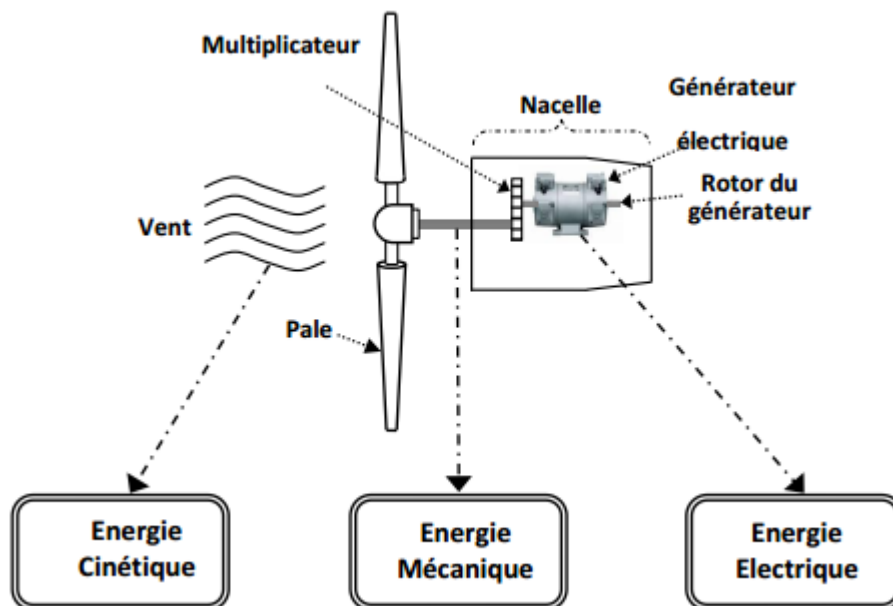


Figure II.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

II.2.3 Les différents types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux grandes familles d'éoliennes existent : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

a. Turbines éoliennes à axe vertical (VAWT)

Ce type d'éolienne se distingue par un axe de rotation vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice directement au sol, ce qui rend la maintenance du système plus simple et donc économique [07], néanmoins cette solution impose que l'éolienne fonctionne avec un vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief.

De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. La figure (II.3) montre trois modèles d'éoliennes à axe vertical.

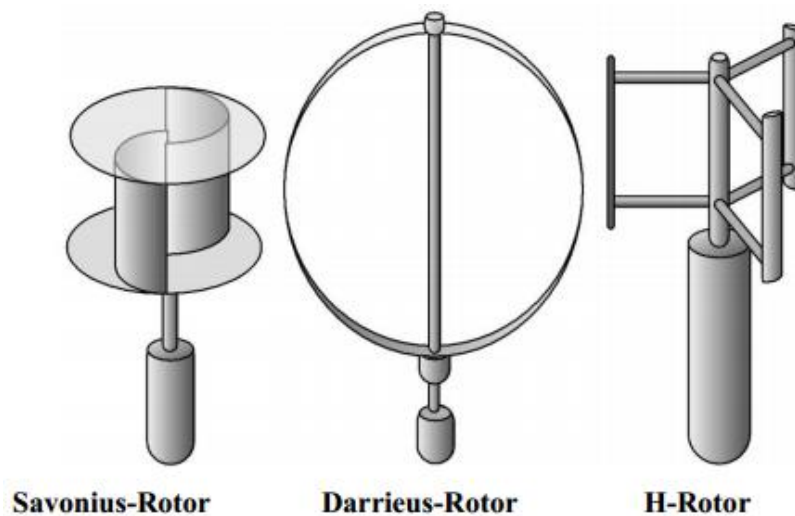


Figure II.3 Exemples de turbines éoliennes à axe vertical.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.

Tous ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont fortement limité le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal.

b. Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT)

C'est de loin la structure la plus répandue de par sa faible emprise au sol et son efficacité énergétique.

Ces éoliennes sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [11].

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

II.2.4 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne se compose essentiellement des éléments ci-après (figure II.4).

❖ La tour (mât)

Permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.). Il

est de conception différente selon les dimensions de l'éolienne et selon l'impact souhaité sur le paysage. On rencontre les structures de mâts représentés dans la figure (II.5).

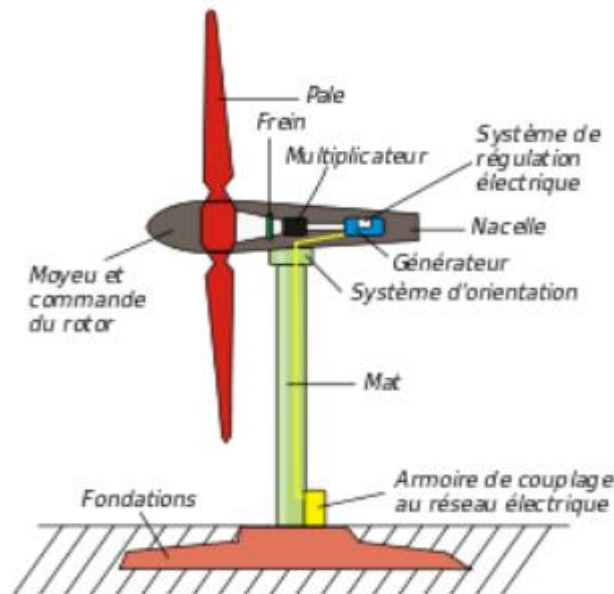


Figure II.4 Composants d'une turbine éolienne.

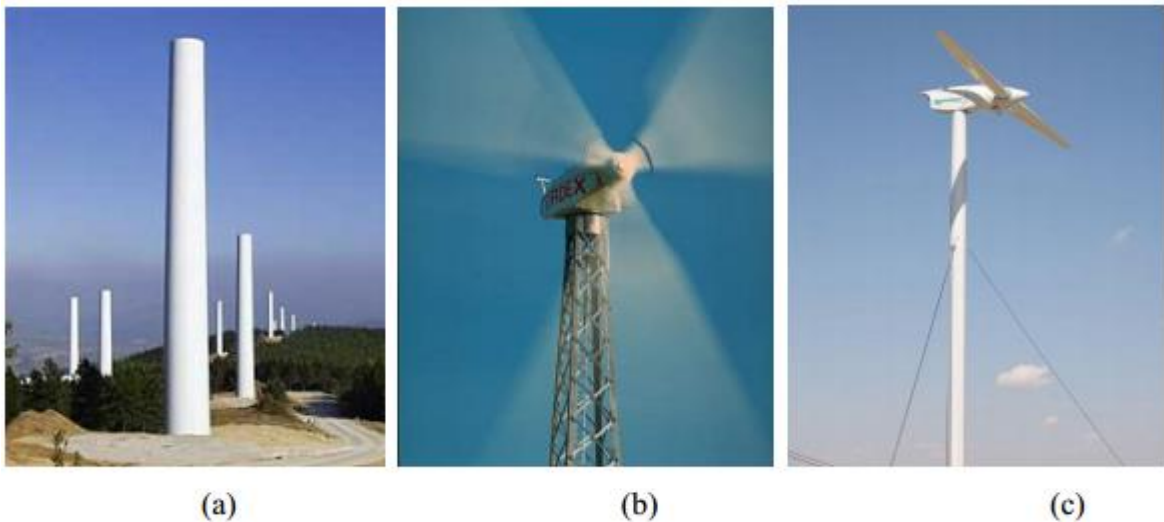


Figure II.5 Modèles de mâts d'éoliennes à axe horizontal ; a) Mât autoporteur, b) Mât en treillis, c) Mât haubané.

❖ Le rotor

Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers.

Il est composé de plusieurs pales (en général trois) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières

peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute. Il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique...).

❖ La nacelle

Montée au sommet de la tour : composée d'un carter ou bâti qui enveloppe, protège et relie entre elles l'ensemble des éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur.

❖ Le moyeu

Un moyeu qui supporte les pales. Lorsqu'elles sont à pas variable, il comporte un mécanisme permettant de faire varier l'angle d'attaque simultanément. On peut également devoir ajuster l'angle des pales fixes, aussi on prévoit toujours une façon de corriger l'installation des pales.

❖ Le générateur électrique

Un générateur électrique permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique qui peut être :

- Directement couplé à l'aéromoteur : dans le cas le plus simple, l'hélice est montée directement sur l'axe du générateur électrique (génératrice synchrone);
- Entraîné par un multiplicateur placé entre l'aéromoteur et le générateur électrique (génératrice asynchrone).

❖ Un système d'orientation

C'est un moteur électrique dans le cas des grandes éoliennes. Il permet à la machine de présenter le rotor au vent quelle que soit sa direction. L'énergie électrique produite est transmise de la partie orientable à la partie fixe de l'aérogénérateur, solidaire du pylône support, par l'intermédiaire d'un dispositif à collecteur associé au pivot ou d'un câble souple qu'il faut dé-torsader périodiquement.

- ❖ Un arbre
Dit arbre lent entre le rotor et la boîte de vitesse et arbre rapide entre le multiplicateur et la génératrice. C'est une pièce imposante car elle subit des efforts élevés. Pour les éoliennes sans boîte de vitesse (synchrones), il n'y a qu'un arbre unique.
- ❖ Un gouvernail
Pour les petites machines, dans le cas où l'hélice de la machine fonctionne "au vent" ou des moteurs associés à une girouette et destinés à maintenir la machine face au vent.
- ❖ Un groupe hydraulique
Qui permet l'orientation des pales et de la nacelle ainsi que le pilotage des freins aérodynamiques.
- ❖ Un frein à disque
Placé sur l'arbre rapide permet l'immobilisation du rotor lors de la maintenance et palier à une défaillance éventuelle du frein aérodynamique.
- ❖ Armoire de couplage
Qui transforme l'énergie produite par l'éolienne pour l'injecter dans le réseau de distribution ou charge.
- ❖ Une girouette et un anémomètre
Situés sur la nacelle fournissent les informations nécessaires pour orienter correctement l'éolienne de façon automatique.

II.3 Système de régulation et de protection de l'éolienne

C'est un élément essentiel de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor. Ces systèmes peuvent être plus ou moins fins, et plus ou moins automatiques.

La plupart des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. On cherche donc à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même [21].

On appelle « vitesse de régulation » la vitesse du vent à laquelle le mécanisme de régulation est pleinement activé.

III.2.1 Système de freinage manuel

C'est le moyen le plus simple pour éviter la destruction d'une machine, lorsque le vent atteint une certaine vitesse, un opérateur immobilise l'éolienne, cette immobilisation peut être effectuée de plusieurs manières [20] :

- À l'aide d'un frein ;
- En changeant l'orientation de l'hélice : l'hélice est placée parallèlement au vent ;
- En modifiant le calage des pales afin d'obtenir un couple moteur nul.

II.3.1 Système de freinage automatique

a. Régulation et freinage par basculement de l'éolienne

Le basculement de l'éolienne entraîne une réduction de la surface effective balayée par le rotor. Pour réduire cette surface il faut augmenter l'angle formé par l'axe de rotation du rotor et la direction du vent dominant soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en la faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est "effacé" vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement.

b. Régulation et freinage par gouvernail articulé

À partir d'un certain niveau de vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement en travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force.

c. Système de régulation aérodynamique

❖ Le pas variable

Le pas variable, aussi appelé "pitch control", est un système de régulation aérodynamique actif.

Ce système permet :

- D'arrêter l'éolienne ou en limiter la puissance afin de la protéger des vents violents en plaçant les pales en drapeau et réduisant ainsi la prise au vent ;
- De maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer : généralement les pales pivotent de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent de manière à ce que les pales soient toujours positionnées avec un angle optimal par rapport à la direction du vent pour en extraire la puissance maximale.

C'est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne [22].

❖ Le pas fixe

Le pas fixe, aussi appelé "stall control", est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor. En effet grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente [21].

❖ Les volets

Les volets (aérofrein ou flaps) s'ouvrent automatiquement, si la vitesse du vent devient excessive ou si un problème est décelé, et ralentissent les pales ou diminuent leur portance en provoquant un décrochage aérodynamique.

❖ Les spoilers

Les spoilers sont encastrés dans le bord d'attaque des pales (freinage aérodynamique).

Chaque spoiler est maintenu dans son logement par un ressort de rappel et une masse tarés individuellement en fonction de la position du spoiler sur le bord d'attaque de la pale. À partir d'une certaine vitesse linéaire, la force centrifuge provoque l'éjection de tous les spoilers au même moment modifiant ainsi le profil aérodynamique de la pale.

d. Arrêt par frein à disque automatique

Un détecteur de vitesse déclenche, à un certain seuil prédéterminé, un mécanisme automatique d'arrêt complet de l'éolienne. Il ne s'agit plus d'un système de ralentissement, mais bien d'un stoppage complet. Lorsque le vent baisse d'intensité, le frein est relâché et l'éolienne est de nouveau libérée. Ces arrêts peuvent aussi être déclenchés lorsque l'automate détecte un problème de réseau [24].

e. Régulation active par décrochage aérodynamique

Aussi appelé "active stall", ce système est utilisé pour les éoliennes de fortes puissances, il utilise les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité.

II.4 Les génératrices d'éoliennes à vitesse variable

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [12]. Le contrôle au niveau de cette dernière permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

II.4.1 Eolienne à vitesse fixe

Dans le premier cas (figure 2.6), le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas). Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés [25].

II.4.2 Eolienne à vitesse variable

Dans le deuxième cas (figure II.7), une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [26].

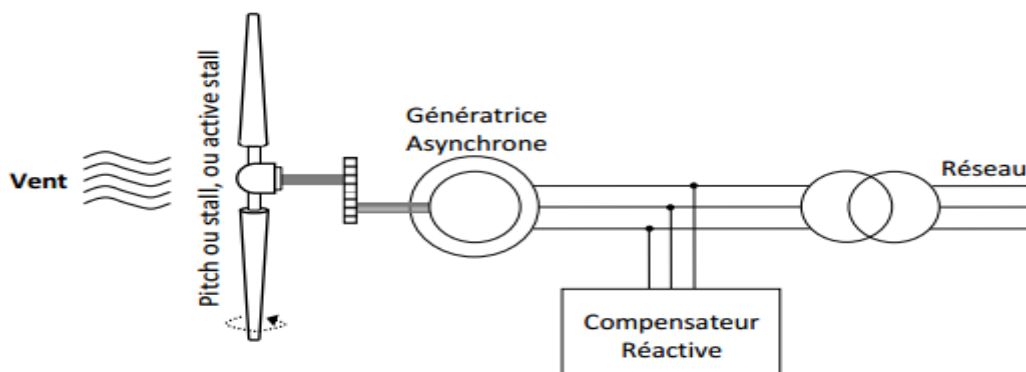


Figure II.6 Eolienne vitesse fixe.

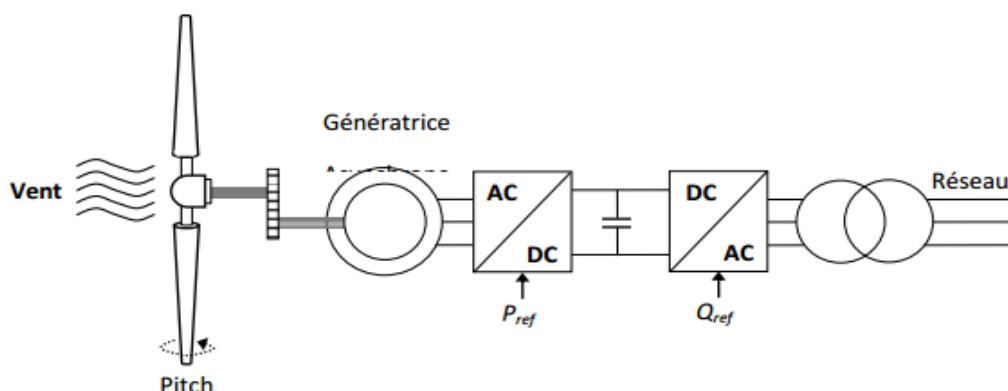


Figure II.7 Eolienne vitesse variable.

Le tableau II.1 illustre un comparatif simple entre les deux types de fonctionnement.

Tableau II.1 Comparatif entre la vitesse fixe et la vitesse variable.

Fonctionnement a vitesse fixe	Fonctionnement a vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplicité du système électrique ; ➤ Plus grandes fiabilité ; ➤ Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne ; ➤ Moins cher ; ➤ Fonctionnement à une vitesse variable (+30% de la vitesse nominale) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Augmantation du rendement énergétique ; ➤ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ; ➤ Réduction des efforts subis par le train de puissance ; ➤ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité ;

II.4.3 Système utilisant une génératrice synchrone

a. Exploitation dans l'éolien

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous multiple de la pulsation des courants statoriques.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [13], [14].

b. Avantages et inconvénients

Le tableau II.2 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

Tableau II.2 Avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ; ➤ Absence de boîte de vitesse ; ➤ Fonctionnement à une vitesse variable sur toute la plage de vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Machine spécifique ; ➤ Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale ; ➤ Grande diamètre de la machine.

II.4.4 Système utilisant une génératrice asynchrone

a. Exploitation dans l'éolien

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique.

Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu.

b. Avantages et inconvénients

Le tableau II.3 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices asynchrones.

Tableau II.3 Avantages et inconvénients des génératrices asynchrones.

Avantages	inconvénients
➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ;	➤ électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale ;

II.3.5 Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

a. Principe de la machine asynchrone à double alimentation

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique (figure II.8). La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir constante la tension du bus continu.

b. Avantages et inconvénients

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique. Le tableau II.4 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice [27].

Tableau II.4 Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation.

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ; ➤ Electronique de puissance dimensionnée au moins à 30% de la puissance nominale; ➤ Fonctionnement à une vitesse variable (-+ 30% de vitesse nominale). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Maintenance de duplicateur ; ➤ Commande complexe ; ➤ Oscillation mécaniques.

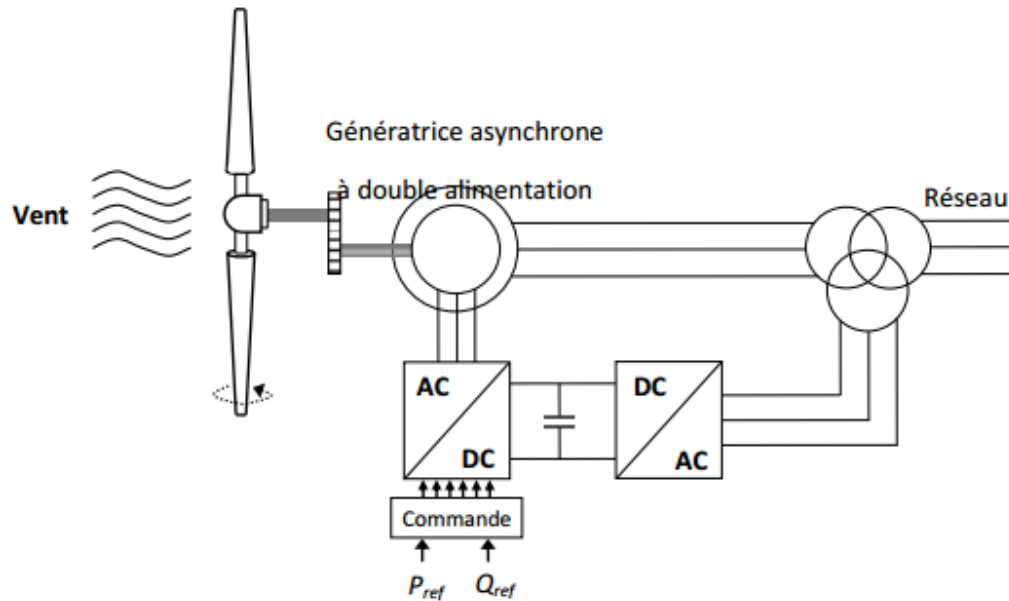


Figure II.8 Eolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

II.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [13].

II.5.1 Les Avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global
- Du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général.

La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050.

Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à

95 cm d'ici l'an 2100, l'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂ [ACK 05].

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [28].

Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- 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.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

II.5.2 Les inconvénients :

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

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée [35].

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines [29].
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.

La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [15].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous discutons de l'énergie éolienne, en commençant par une introduction suivie d'une description des éoliennes contenant l'historique, la description, les types et les principaux composants des éoliennes. Vient ensuite le système de protection et de régulation des éoliennes avec deux systèmes, le premier à freinage manuel et le second à freinage automatique. Ensuite, nous avons discuté des éoliennes à vitesse variable. Enfin, nous avons évoqué les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Chapitre III

Intégration de l'éolienne dans un réseau électrique

III. Intégration de l'éolienne dans un réseau électrique

III.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'une des productions décentralisées dont le pouvoir de l'intégrer dans le réseau électrique. Cette intégration doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct. Les techniques de raccordement imposé, le choix de niveau de tension d'intégration dans les réseaux électriques et ses impacts seront traités dans ce chapitre [30].

III.2 Technique de raccordement

Selon chaque pays, compte tenu des impacts que peuvent avoir les moyens de production sur les réseaux, des conditions techniques spécifiques de raccordement sont reconnus par codes de distribution [16].

III.2.1 Connexion au réseau

L'éolienne connectée au réseau, a un impact plus ou moins important sur la qualité de l'énergie. De plus, les parcs éoliens sont situés dans un territoire où les vents sont favorables et où le réseau est peu développé. Cependant, les parcs éoliens doivent être connectés de plusieurs façons, par exemple :

- Parc éolien connecté à la ligne moyenne tension (HTA) (puissance transmissible - de 2 à 5 MW).
- Si la ligne HTA est trop faible pour le parc éolien, elle peut être connectée au jeu de barres HTA de la sous-station HTB / HTA la plus proche par sa propre ligne (puissance transmissible de 10 à 40 MW).
- Parc éolien connecté au jeu de Barres HTB dans la sous-station HTB / HTA la plus proche par une ligne propre avec son propre transformateur HTB / HTA (puissance transmissible - jusqu'à 100 MW).

Quelle que soit la méthode de connexion, l'éolienne introduit dans le réseau plus ou moins de variations de puissance. Généralement la solution la plus courante est la connexion en moyenne tension (HTA), qui génère la plupart des interférences [31].

III.2.2 Tension de raccordement

La tension au point de raccordement détermine la puissance maximale de l'insertion de production décentralisée.

III.2.3 La capacité d'accueil des réseaux

La capacité d'accueil en un nœud donné d'un réseau est la puissance de raccordement maximale qui respecte à tout moment les contraintes de tension et de courant sur l'ensemble du réseau examiné. Cette capacité est très souvent limitée par les contraintes de tension haute, (> 1 MW) demandent à être raccordés à l'espace disponible permettant d'y développer de tels projets [27].

$$S_{\text{raccmax}} = S_{\text{source}} + S_{\text{cmin}}$$

III.2.4 Types de raccordement

L'énergie éolienne est comme toute production décentralisée a deux types de raccordement dans le réseau électrique :

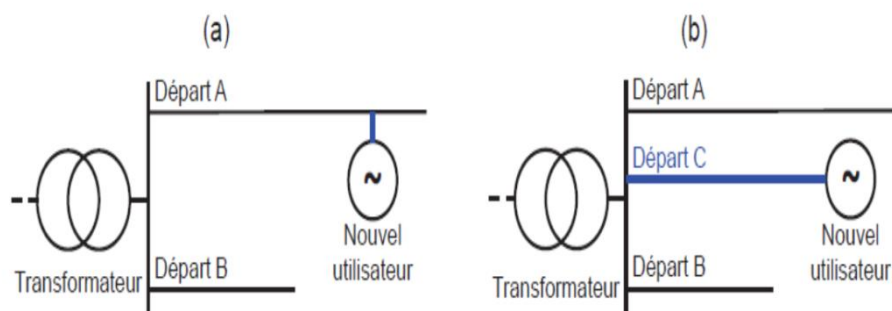


Figure III.1 Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct.

- **Raccordement en départ mixte** : le raccordement à un départ existant auquel des consommateurs et éventuellement des producteurs sont déjà raccordés (Figure III.1.a).
- **Raccordement en départ direct** : le raccordement au poste source le plus proche via un départ nouvellement créé pour le nouvel utilisateur (Figure III.1.b).

III.3 Les impacts de l'intégration d'un système éolien dans le réseau

Le raccordement un système électrique quelconque a un impact remarquable qui dépend de la technologie utilisée, et le type de réseau. En général on peut dire que plus le taux de pénétration est important plus l'impact de l'intégration des énergies renouvelable dans les réseaux est significatif. On peut distinguer des impacts locaux et globaux [17].

III.3.1 Impacts Locaux

Ce sont les impacts qui se produisent dans le point de raccordement de l'unité. Les impacts locaux sont en général indépendants du taux de pénétration global des unités de production des énergies dans le système. Ils concernent deux principaux aspects : la capacité d'accueil du réseau et la qualité de tension :

Plan de tension : Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseaux auxquels elles sont connectées. Selon la nature du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par l'éolienne, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite admissible [30].

Court-Circuit : L'impact sur le courant de court-circuit dû aux éoliennes qui suivant la technologie peuvent, en cas de défaut sur le réseau, alimenter et donc accroître le courant de court-circuit circulant dans le réseau.

Plan de protection : Le plan de protection est un système coordonné de protections visant à isoler très rapidement un ouvrage en défaut (ligne, transformateur, jeu de barres, etc.) afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. Différents types de relais mesurant différentes grandeurs physiques sont utilisés [27].

III.3.2 Impact globaux

Les unités de production des énergies renouvelables peuvent avoir des impacts plus globaux à l'échelle d'une région surtout si elles sont raccordées au réseau de transport ou dans les réseaux insulaires [30].

Impact sur le fonctionnement des systèmes : La problématique majeure liée à l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux est de deux ordres :

➤ La variabilité de la production d'énergie renouvelable du fait des variations de l'énergie primaire qui de plus est non contrôlable (fatale).

➤ L'incertitude sur les prévisions météorologiques induisant une incertitude sur la production. Car les prévisions de vitesse de vent sont moins fiables que celles de l'ensoleillement [30].

Les deux aspects cités plus haut ont trait à des impacts liés surtout à la réalisation de l'équilibre production-consommation à divers horizons temporels. Outre ces préoccupations, restent celles liées à la sécurité du réseau du point de vue global.

Capacité de transport : L'impact de l'intégration dépend de la situation géographique de la production renouvelable par rapport à la demande, de la corrélation entre cette production et la demande et de la puissance du réseau initial.

Impacts sur le sens de transit de puissance : L'insertion d'une production décentralisée (l'énergie éolienne...) dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales.

Dispatching : Cet impact est dû à la variabilité et aux erreurs de prédiction de la production d'énergie renouvelable. Il est donc important de développer des méthodes pour analyser et intégrer l'impact des énergies renouvelables sur la gestion prévisionnelle du parc de production [18].

III.4 Simulation et interprétation des résultats

Afin d'analyser l'influence de l'intégration d'une production éolienne au réseau de distribution, nous allons réaliser une modélisation d'un système qui se compose par une éolienne intégrée dans un réseau électrique, ensuite nous allons étudier le comportement de différentes parties de ce modèle. Notamment, l'influence du vent sur les tensions et les puissances produites ainsi que la perte dans le réseau avant et après l'intégration de l'éolienne dans le réseau électrique. Puis, nous allons étudier l'impact de l'intégration d'une production éolienne au réseau [36].

La modélisation de système est effectuée à l'aide de MATLAB/Simulink (qui nous a permis d'intégrer et manipuler tous les composants) ainsi que les courbes de la puissance de sortie basées sur les paramètres d'entrée [37].

III.5 Conception et simulation de système d'énergie éolienne

La figure ci-dessus représente le schéma bloc de l'éolienne sous Le modèle Simulink du système d'énergie éolienne de 12 kW connecté au réseau est donné comme suit [32] :

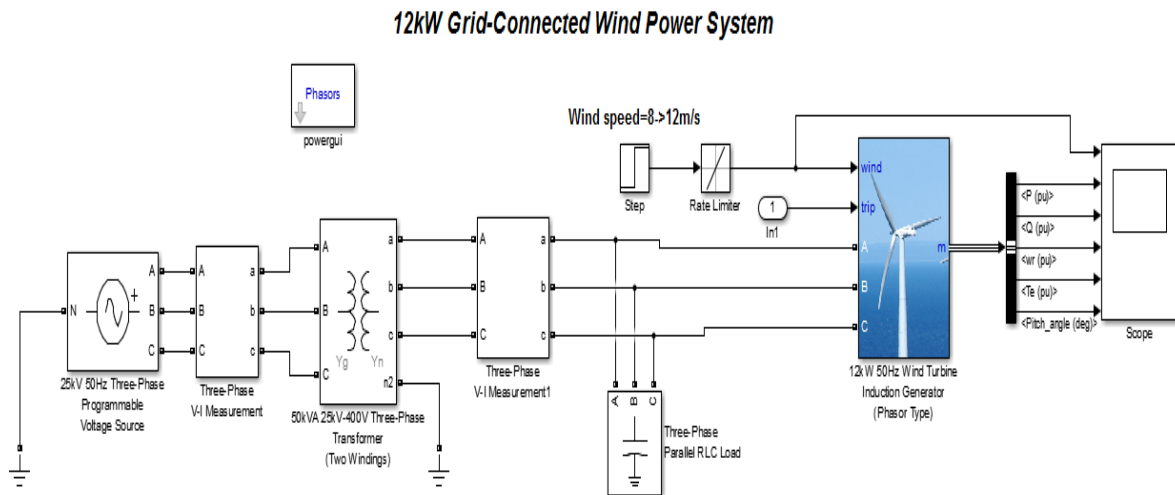


Figure III.2 Le modèle d'intégration d'éolienne dans un réseau électrique.

III.5.1 Explication du modèle

À l'extrême gauche, il y a une alimentation en tension triphasée qui est alimentée par le réseau à 25 kV générant à une fréquence de 50 Hz.

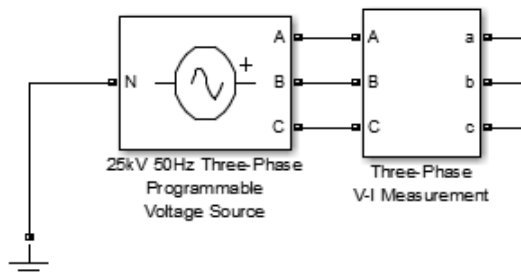


Figure III.3 Alimentation en tension triphasée.

Alors que nous nous déplaçons vers la droite, il y a un transformateur triphasé à deux enroulements avec un arrangement Yg-Yn. Il a une puissance nominale de 50 kVA avec un côté primaire à 25 kV et un côté secondaire à 400 V [18].

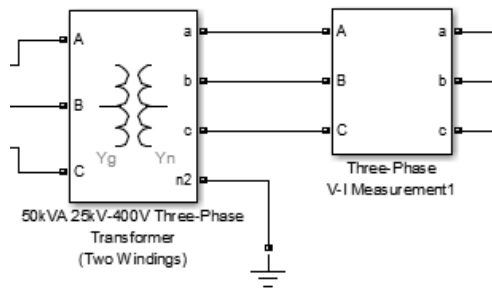


Figure III.4 Transformateur triphasé.

Ensuite, il y a une batterie de condensateurs injectant 4 kVar au générateur d'induction de l'éolienne.

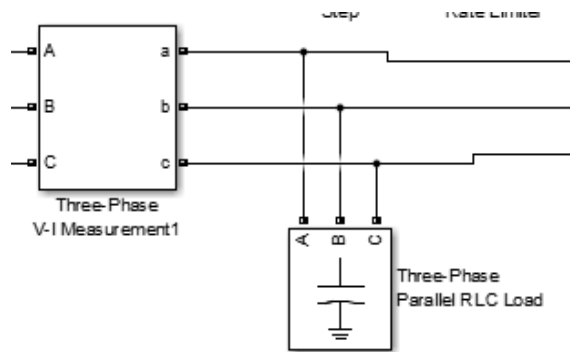


Figure III.5 Une batterie de condensateurs.

Le modèle de turbine éolienne reçoit à l'entrée de trois phases à partir du réseau et de la vitesse du vent à l'aide d'un bloc de pas. La sortie de l'éolienne est visualisée à l'aide du bloc de portée [34].

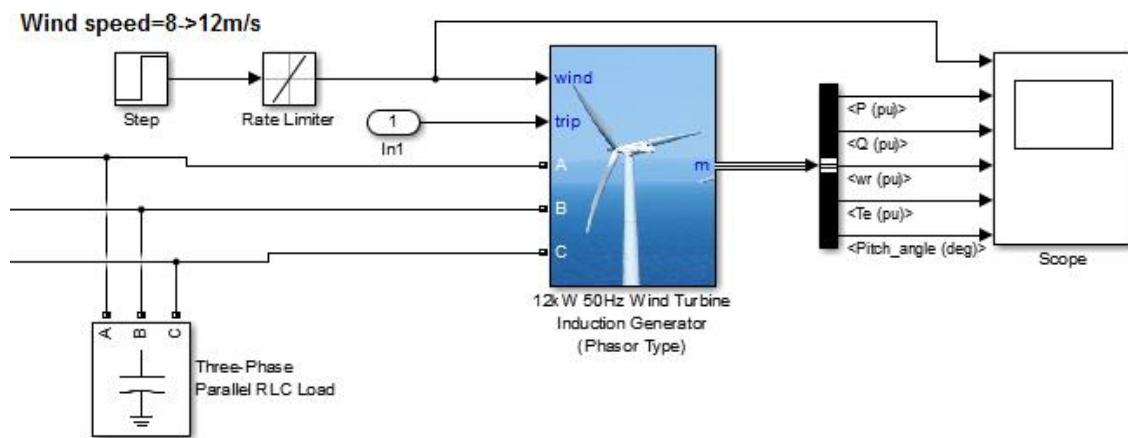
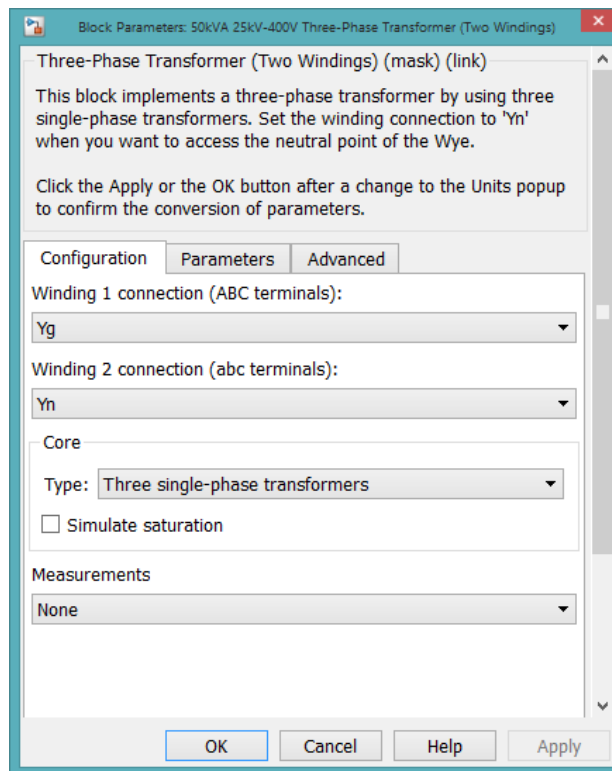


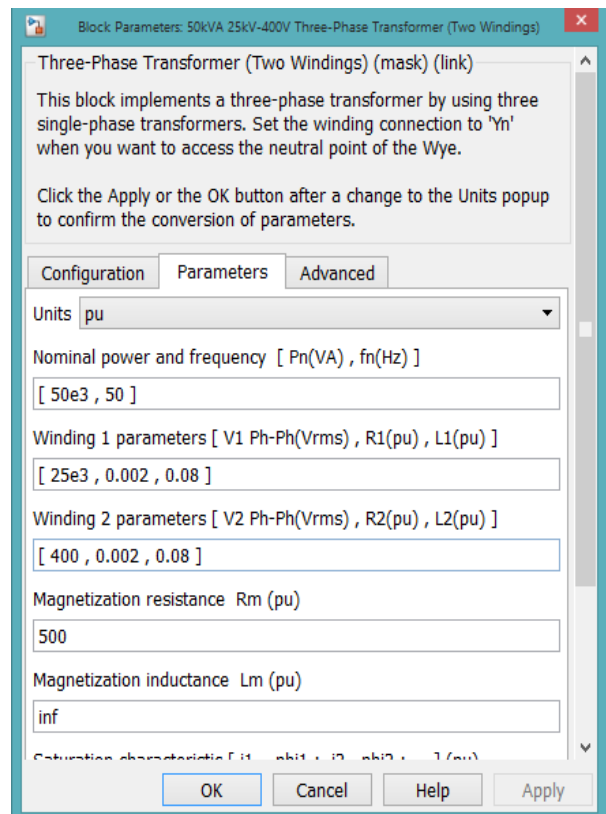
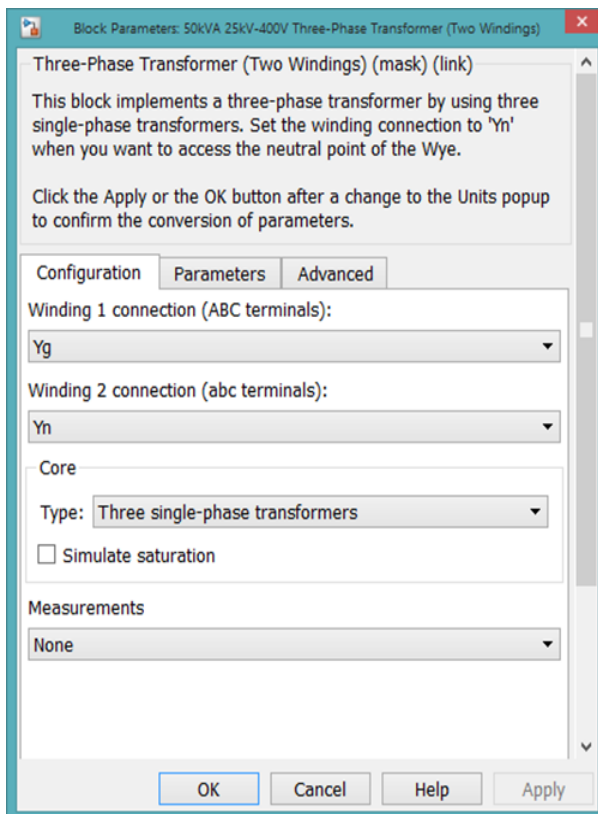
Figure III.6 L'entrée de trois phases et La sortie de l'éolienne dans le modèle de turbine.

III.6 Paramètres utilisés dans les blocs

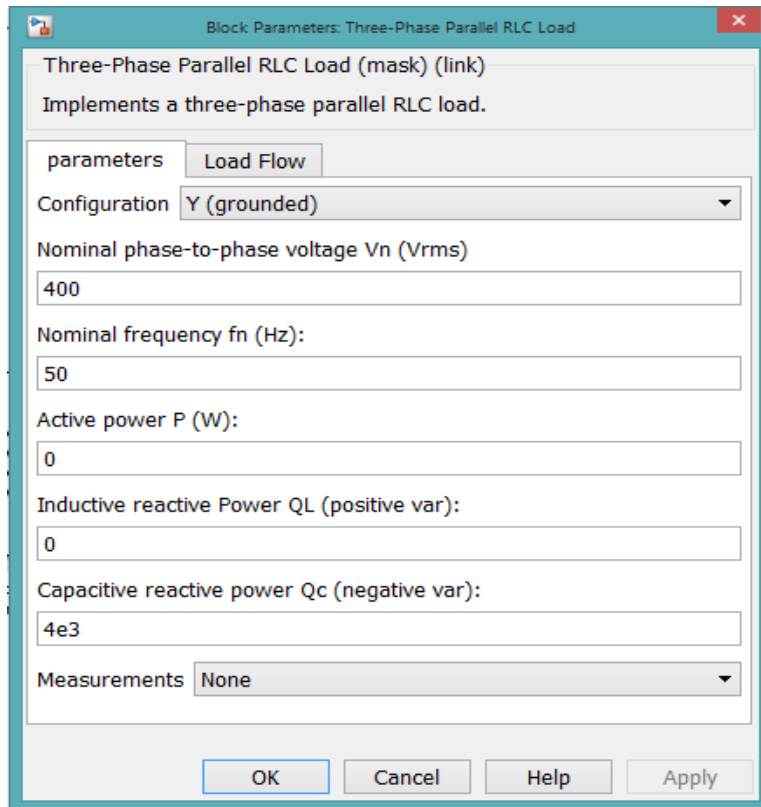
Alimentation en tension triphasée côté réseau



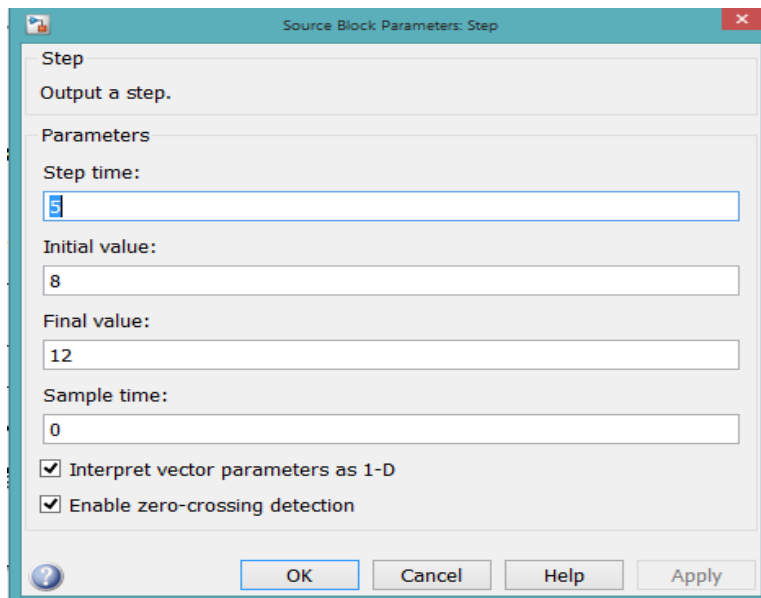
Transformateur triphasé



Charge triphasée qui est utilisé comme une batterie condensateur pour injecter 4 kVar

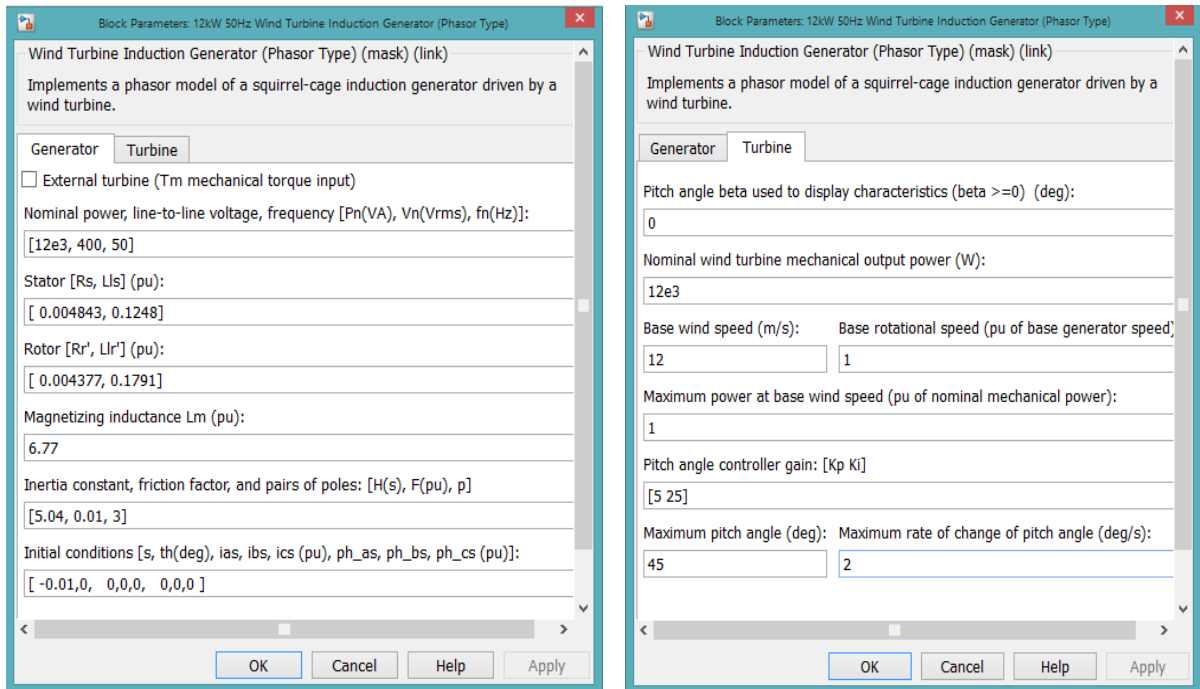


L'Étape utilisé pour donner une entrée de vitesse de vent variant de 8 à 12 m/s.



Bloc turbine d'éolienne

Modification de la puissance requise (12 kW) en conséquence et des tensions de 400 V, fréquence de 50 Hz.



III.7 Les résultats des simulations et interprétation

Après les simulations effectuées, nous avons obtenues différents résultats qui seront discuter un par un.

III.7.1 Caractéristiques de l'énergie éolienne

Le graphique suivant montre la puissance de sortie à différentes vitesses de vent. Comme nous avons sélectionné un vent de 12 m/s comme une vitesse nominale, il affiche la puissance maximale de 1 pu (12 kW) sur une vitesse de vent de 1 pu (12 m/s).

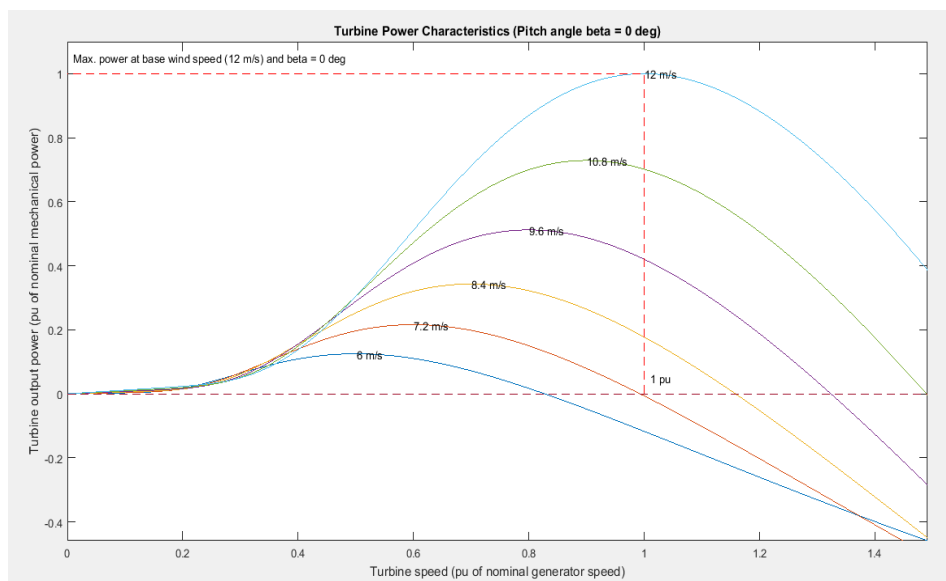


Figure III.7 La puissance de sortie à différentes vitesses de vent.

La puissance de sortie à d'autres vitesses de vent est également indiquée sur le graphique. **P, Q, wr, Te, Angle de tangage, Vitesse du vent :**

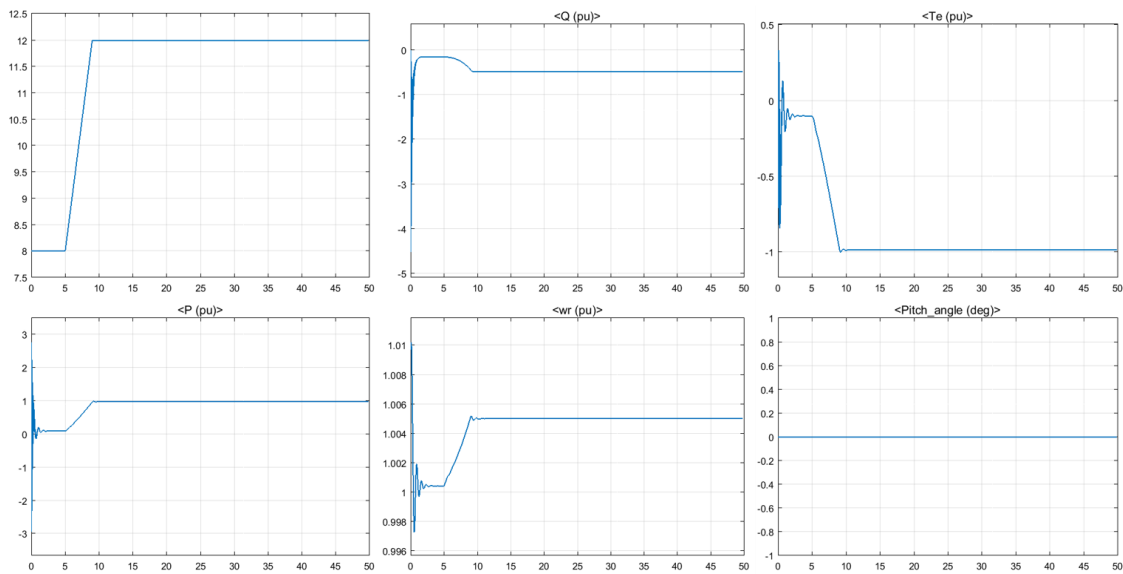


Figure III.8 Les différents résultats de simulation effectuée.

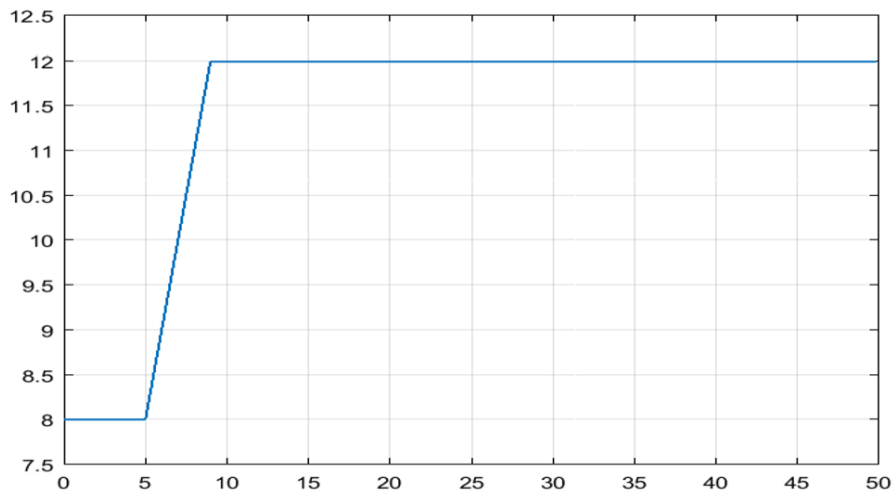


Figure III.9 La vitesse du vent (v).

Le premier graphe présente la vitesse (v) du vent qui a été en premier temps à un niveau stable avec une valeur de 8 m/s jusqu'au second 5 s, en ce moment cette dernière commence à augmenter d'une façon linéaire jusqu'à la valeur 12 m/s au moment 9 s, après ce moment reste stable jusqu'à la fin.

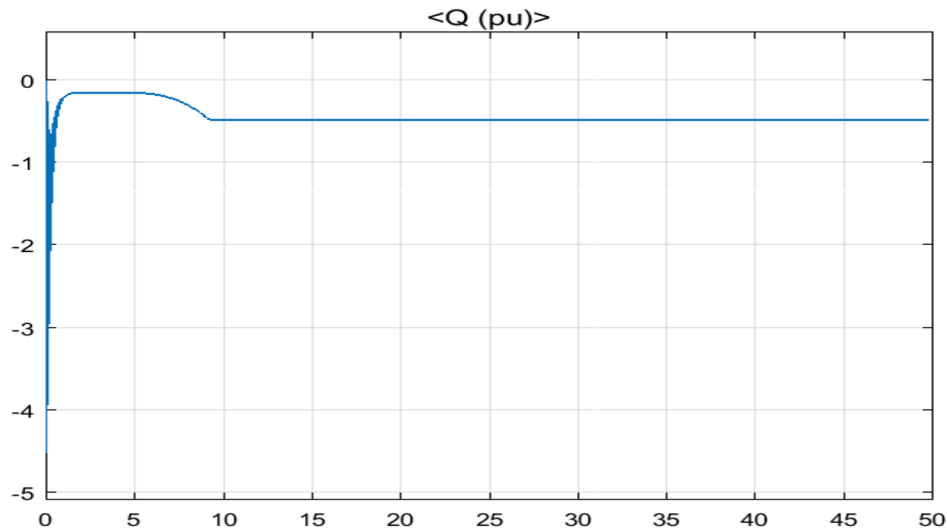


Figure III.10 L'évolution de la valeur routeur absorbé par le réseau électrique.

Le deuxième graphe montre l'évolution de la valeur routeur absorber par le réseau électrique (Q) qui est nécessaire pour inciter le générateur Eolien, sa valeur devienne variable du moment 9 s, ensuite commence à être stable au moment - 0,5 pu.

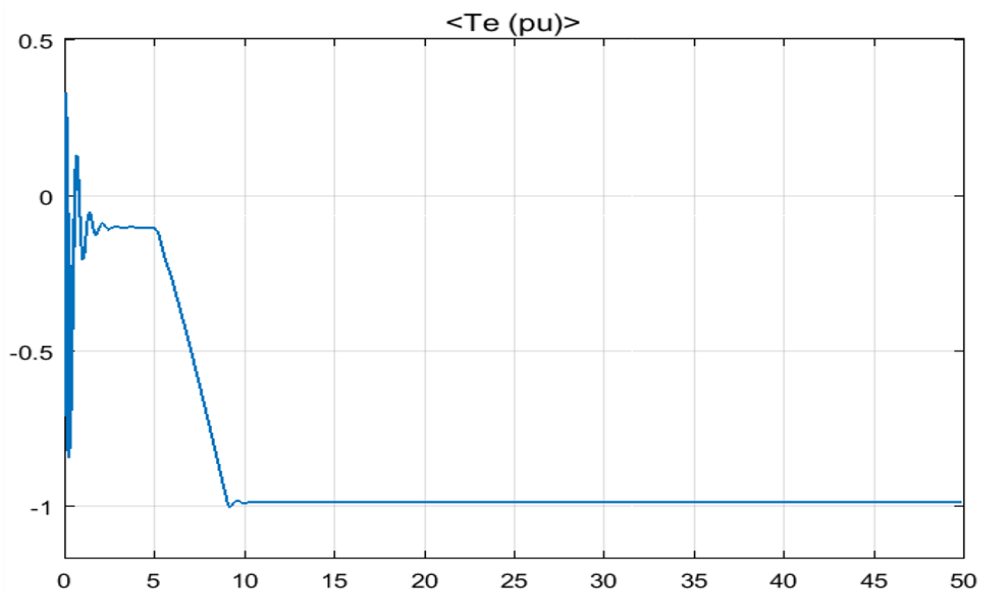


Figure III.11 La variation de torsion (Te) du générateur éolien.

Le troisième graphe explique la variation de torsion (Te) du générateur éolien T_e en fonction du temps, sa valeur change du moment 0 s jusqu'au 9 s, ensuite se stabilise à la valeur - 0,5 pu.

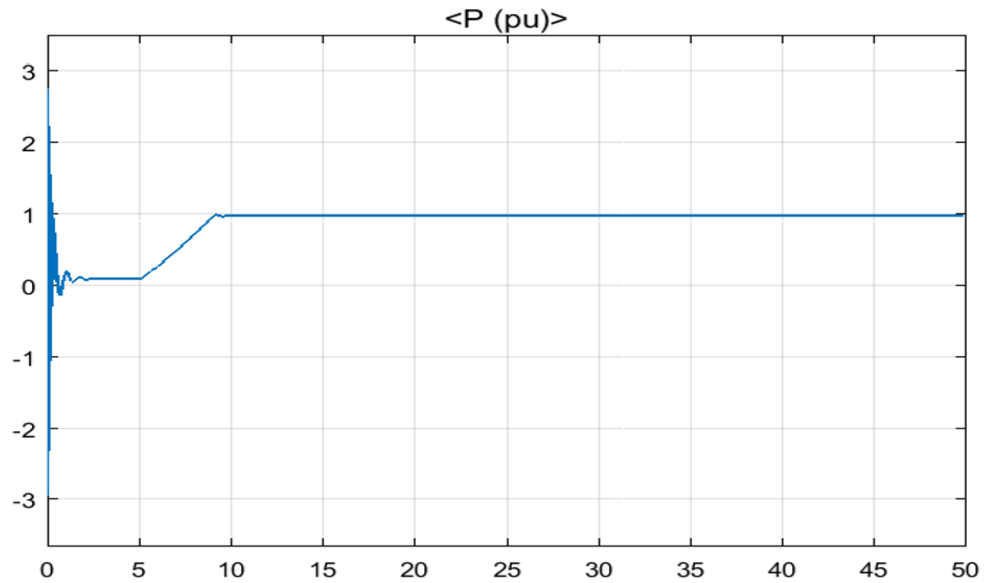


Figure III.12 Le changement de la puissance (p) active produite par le générateur éolien.

Le quatrième graphe présent le changement de la puissance (p) active produite par le générateur éolien intégré dans le réseau électrique, le changement de sa valeur commence du moment 0 s jusqu'au 9 s, ensuite se stabilise à la valeur 1 pu.

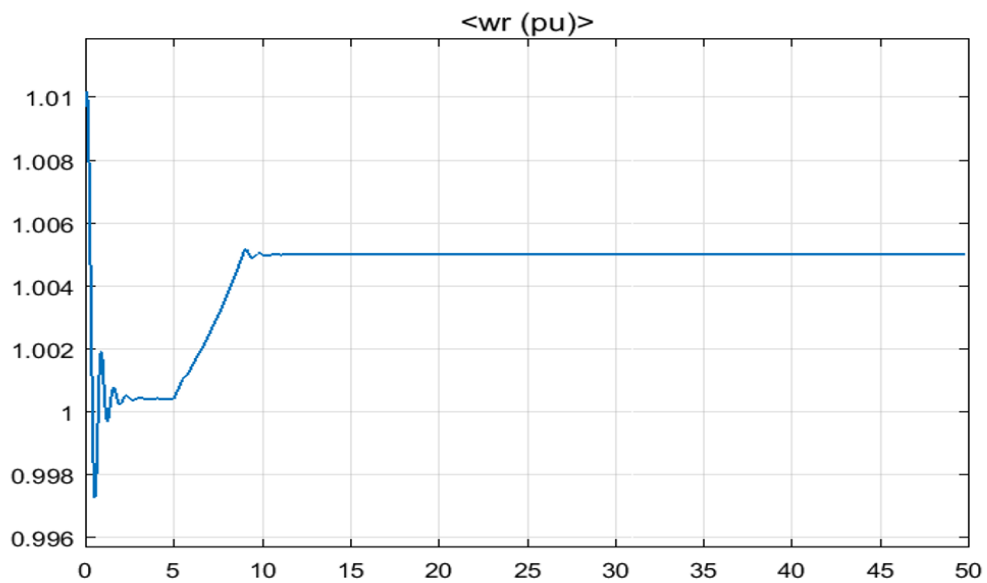


Figure III.13 La variation de la vitesse de routeur.

Le cinquième graphe affiche la variation de la vitesse de routeur (wr) du générateur éolien dont sa valeur est variable à partir du moment 0 s jusqu'au 9 s, ensuite elle soit stable la valeur 1,005 pu.

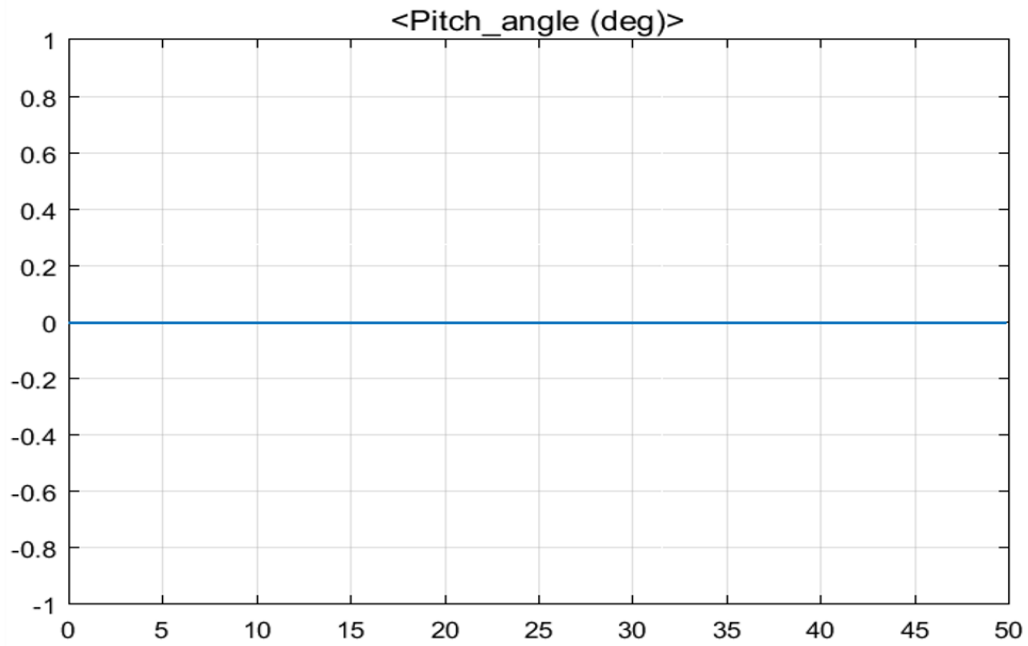


Figure III.14 Le sixième graphe.

Le sixième graphe explique la variation de la valeur d'angle de tangage qui reste stable à la valeur 0 deg.

III.8 L'état de réseau avant et après l'intégration d'éolienne

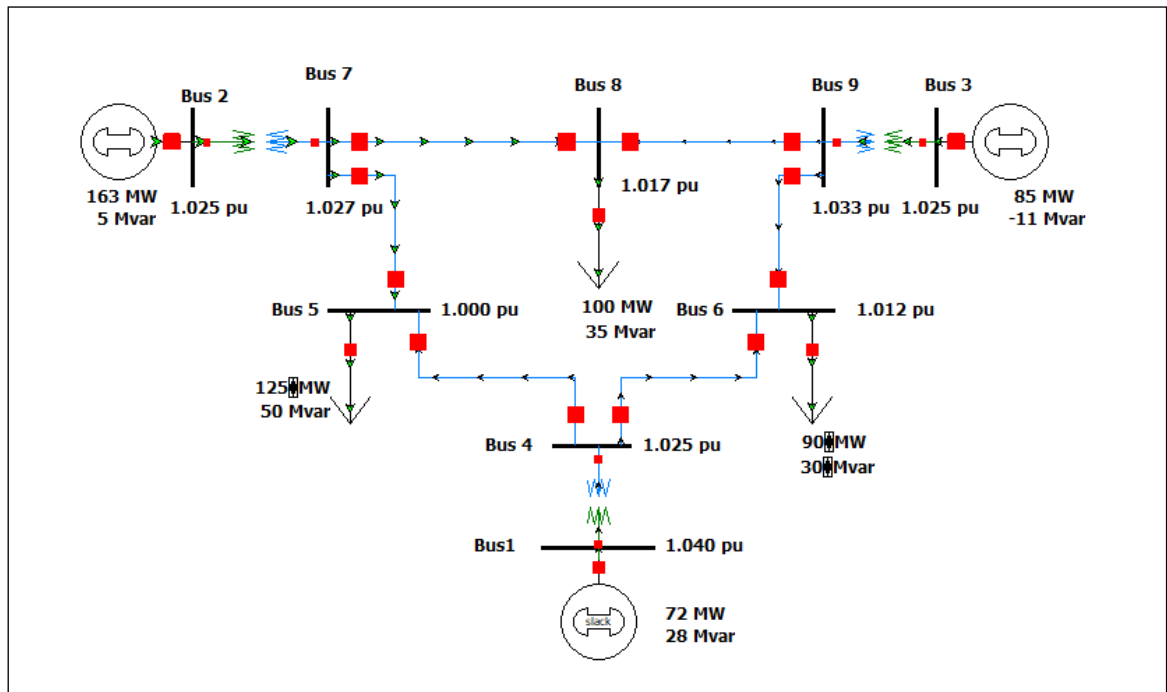


Figure III.15 Réseau électrique avant l'intégration de l'énergie éolienne.

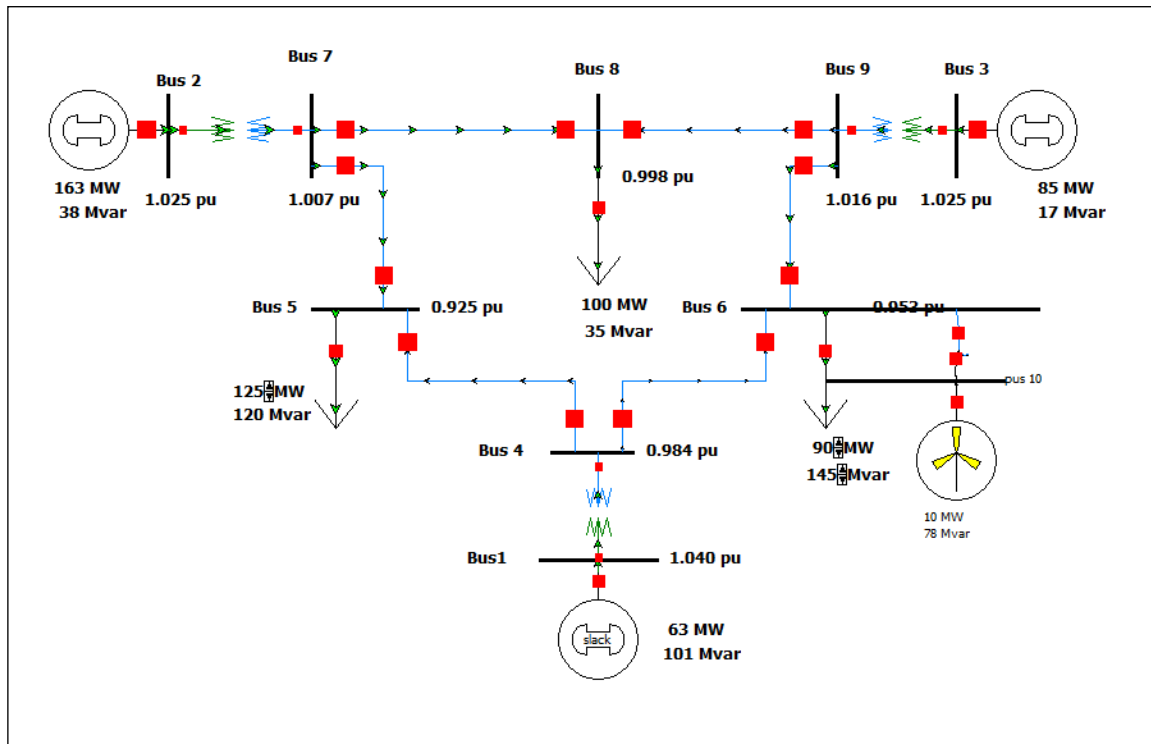


Figure III.16 Réseau électrique après intégration de l'énergie éolienne.

Tableau III.1 La différence entre les valeurs de puissance avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.

PUVolt	PU Volt	Name
1.04	1.04	Bus1
1.025	1.025	Bus 2
1.025	1.025	Bus 3
0.98449	0.95339	Bus 4
0.92513	0.89758	Bus 5
0.95311	0.8662	Bus 6
1.00666	0.99607	Bus 7
0.99804	0.9838	Bus 8
1.01647	0.99693	Bus 9
1		Bus10

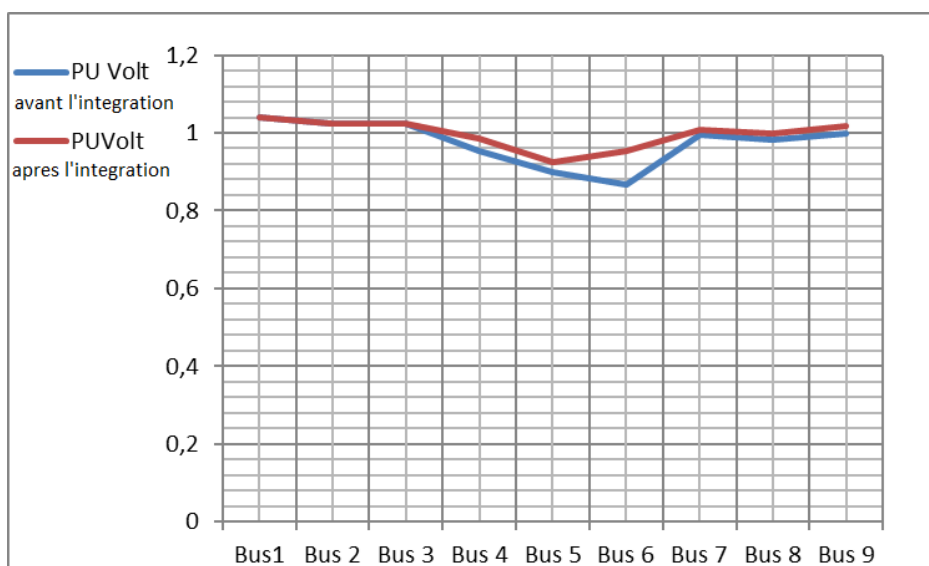


Figure III.17 La différence entre les valeurs de la portée avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.

III.8.1 La différence de valeur de PU volt avant et après l'énergie éolienne est intégrée au réseau électrique.

A travers le tableau et le graphique précédents qui montrent la différence de la valeur de PU volt avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, comme aux deux instants Bus5 et Bus6, on constate un défaut et une diminution de la valeur du PU volt aux valeurs 0.68 V et 0.89 V. Après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, nous constatons une augmentation de la valeur de PU volt après qu'elle a été réduite à une valeur de 0.92V et 0.95 V et revenue à la valeur d'origine, et donc la diminution de PU volt a été compensée par le vent l'énergie après son intégration dans le réseau électrique.

Tableau III.2 La différence entre les valeurs de perte de (MW loss) et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.

MW Loss	MW Loss	From Name
0	0	1Bus 4
0	0	7Bus 2
0	0	3Bus 9
0.85	0.79	4Bus 5
0.23	1.52	4Bus 6
2.78	3.05	5Bus 7
1.71	3.15	6Bus 9
0	0.55	8Bus 7
0.51	0.07	9Bus 8
0.09		Bus10

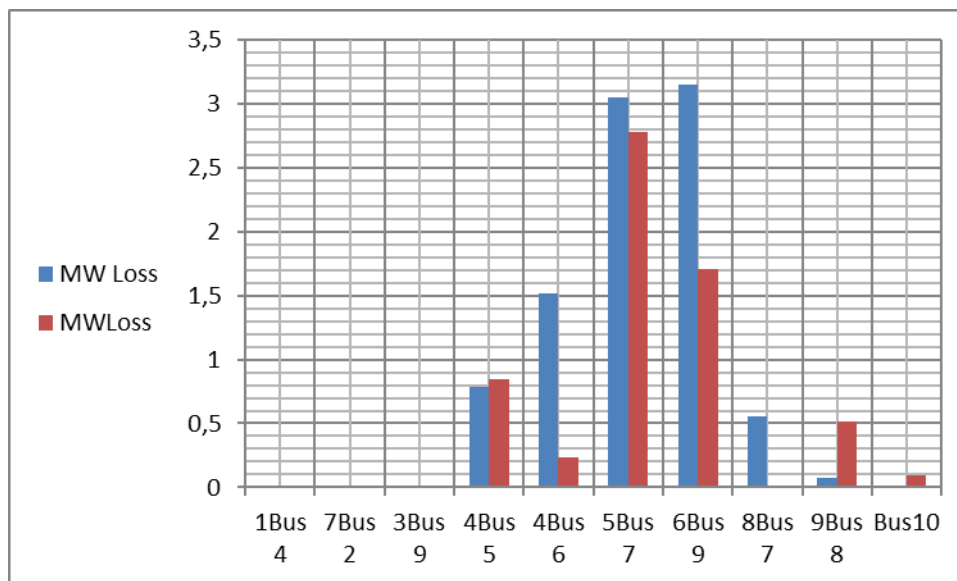


Figure III.18 La différence entre les valeurs de perte de (MW loss) avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.

III.8.2 La différence de valeur de perte en MW loss avant et après l'énergie éolienne est intégrée au réseau électrique.

A travers le tableau et les histogrammes qui montrent la différence de la valeur de la perte MW loss, qui est la perte d'énergie avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, comme aux instants 4Bus6 et 5Bus7 et 6Bus9 on remarque une augmentation des pertes qui atteignent 1.52 MW et 3.05 MW et 3.15 MW. Après intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, on constate une diminution des pertes qui atteignent des valeurs de 0.23 MW et 2.78 MW et 1.71 MW, et son retour à la valeur d'origine est dû à sa compensation par l'énergie éolienne après son intégration dans le réseau électrique.

Tableau III.3 La différence entre les valeurs de perte (Mvar loss) avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.

Mvar Loss	Mvar Loss	From Name
7.6	16.39	1Bus 4
16.67	17.64	7Bus 2
4.19	5.49	3Bus 9
-10.26	-9.69	4Bus 5
-13.61	-4.86	4Bus 6
-14.61	-12.14	5Bus 7
-27.12	-17.2	6Bus 9
3.73	-10.9	8Bus 7
-11.52	-19.91	9Bus 8
-20.44		Bus10

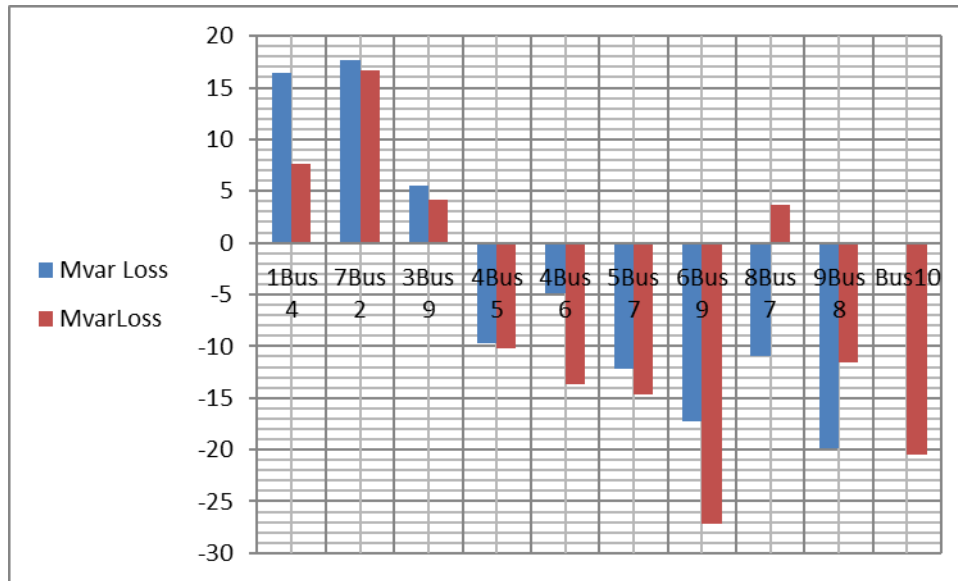


Figure III.19 La différence entre les valeurs de perte de (Mvar loss) avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.

III.8.3 La différence de valeur de la perte de Mvar avant et après l'énergie éolienne est intégrée au réseau électrique.

A travers le tableau et les histogrammes qui montrent la différence de la valeur de la perte Mvar avant et après l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, où aux deux instants 4Bus5 et 4Bus6, on constate une augmentation des pertes atteignant - 0.69 Mvar et -4.86 Mvar. Après intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, on constate une diminution de la perte à la valeur de -10.26 Mvar et -13.61 Mvar et son retour à la valeur d'origine, et donc la perte a été compensée par l'énergie éolienne après son intégration dans le réseau électrique.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a visualisé les résultats des simulations effectuées sur notre système, ces résultats montrent l'avantage de l'intégration d'un système éolien dans un réseau électrique. Tout en surmonte les différentes contraintes liées à cette démarche. La puissance délivrée par le générateur éolien dépend de la vitesse du vent au niveau de la surface balayé par les pales de l'éolienne. Les résultats de la simulation correspondent aux résultats espérés, et montrent qu'il y a concordance avec ceux rencontrés dans de la littérature.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a porté essentiellement sur l'étude et la simulation de l'intégration d'éolienne au réseau électrique. Les travaux ont eu pour but d'utiliser les possibilités offertes par la technologie des éoliennes pour la maximisation du rendement de production électrique et l'harmonisation de son fonctionnement afin de réduire les défis de raccordement qui peuvent être apparaitre lors de l'intégration.

Dans le premier chapitre, nous avons donné des généralités sur l'énergie renouvelables ainsi les différentes notions de bases utilisées dans ce domaine. Une brève historique et état des lieux des énergies renouvelables notamment de la politique énergétique en Algérie.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mené à bien discuter de l'énergie éolienne, une description des éoliennes contenant l'historique, la description, les types et les principaux composants des éoliennes. Vient ensuite le système de protection et de régulation des éoliennes avec deux systèmes, le freinage manuel et automatique. Ensuite, nous avons discuté des éoliennes à vitesse variable. Enfin, nous avons évoqué les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Le chapitre III a porté sur les conditions de raccordement d'éolienne dans les réseaux électriques ainsi leur impact suivi par les résultats de simulation obtenus avec l'interprétation de différentes courbes, les résultats obtenus montrent clairement que la stratégie proposée permet de maintenir le système opérationnel à tout moment, d'augmenter la fiabilité, de réduire les effets indésirables lors d'intégration d'éolienne dans le réseau électrique. Les travaux de recherche rapportés dans ce mémoire avec des résultats validés en simulation sur MATLAB/Simulink seraient certainement considérés comme un développement remarquable dans le domaine des réseaux électriques et dans la technologie des énergies renouvelables.

Les perspectives du travail de recherche de ce mémoire sont ouvertes. Elles peuvent viser l'étude du comportement des parcs éoliens sur un banc d'essai expérimental avec des stratégies intelligentes. On peut aussi envisager de valider l'intégration d'éolienne sur un site réel.

Bibliographie

- [01] FRERIS Léon, INFIELD David, « Les Energie Renouvelable Pour La Production De L'électricité », édition DUNOD, Paris 2009.
- [02] MESTRE V, « étude et simulation d'un véhicule électrique à moteur synchrone mono source ». Thèse de doctorat, école centrale de l'ile.
- [03] LABBE Julien; « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolé » thèse de doctorat, école des mines de paris, 2006.
- [04] GERGAUD Olivier, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat, l'école normal de CACHAN, 2002.
- [05] Sources: BP Statistical Review of world Energy, juin 2021.
- [06] Transition énergétique en Algérie, disponible sur: [https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Rapport CEREFTE-2020-4.pdf](https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Rapport_CEREFTE-2020-4.pdf)
- [07] S. Mathew, « Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics », Springer, Germany, 2006.
- [08] Z. Chen and F. Blaabjerg, « Wind Energy - The World's Fastest Growing Energy Source», IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3, 15-18, 2006.
- [09] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de Nantes, France, 2003.
- [10] Frederic P. Miller, Agnes F. Vandome, John McBrewster, "Énergie Éolienne", Published on: 2010-05-05.
- [11] O. De Vries, « On the theory of the horizontal axis wind turbine », Ann. Rev. Fluid. Mech,15, pp. 77-96, 1983.
- [12] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, ENSAM, 2003.
- [13] B. Raison et al., « L'énergie électrique éolienne, Partie I: Présentation générale et approche probabilistique », Revue Internationale de Génie Electrique, vol. 5/3-4, pp.405- 484, 2002.
- [14] A. S. Neris, N. A. Vovos and G. B. Giannakopoulos, « A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems », IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, n°1, pp. 122-127, March 1999.
- [ACK 05] T. Ackermann, "Wind Power in Power System", John Wiley & Sons, Ltd, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2005.
- [15] Belkache, Idir. « Simulation et optimisation des échangeurs thermiques dans une tour solaire ». Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [16] Ayoub, et al. « Commande prédictive d'une génératrice asynchrone à double alimentation ». 2021.
- [17] ALLEM Sofiane, BOUAROUR Younes, « Commande en Puissance de la Machine Asynchrone À Double Alimentation par les Régulateurs PI et PI Flou », Thèse de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2021.
- [18] ZOUGGAR, El Oualid. « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones ». 2021. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [19] KAMEL, Abderraouf. « Etude de la robustesse et l'optimisation fiabiliste : application à des éoliennes avec la prise en compte de l'interaction sol structure ». 2021. Thèse de doctorat. Normandie Université, École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie).
- [20] KHALED, ARARIA et ADDA, BOUCIF. « Étude et simulation de l'intégration d'une ferme éolienne offshore au réseau électrique via une ligne HVDC ». Thèse de master. Université Ibn-Khaldoun De Tiaret, 2020.
- [21] ROBYNS, Benoit, DAVIGNY, Arnaud, SAUDEMONT, Christophe, et al. « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ». J3eA, 2006, vol. 5, p. 003.

- [22] NOTTON, Gilles, NIVET, Marie-Laure, VOYANT, Cyril, et al. « Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences cost of intermittence and benefit of forecasting ». *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018, vol. 87, p. 96-105.
- [23] SYLLA, Abdoulaye Mamadie. « Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation ». 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [24] CHELLIG, Samia. « Impact des fermes éoliennes sur la stabilité de tension dans les réseaux électriques ». 2018. Thèse de doctorat ». Université Ferhat Abbas — Sétif.
- [25] BOUAKRA, Abdellah. « Impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique ». 2016. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [26] GHENNAM, Tarak. « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». 2011. univ-lille.
- [27] GOMEZ, Lina Maria Ruiz. « Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques ». 2012. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- [28] NAWA Hacenna, « Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique », Thèse de master, 2019, Université 8 Mai 1945 – Guelma.
- [29] SAIDA, MAKHLOUFI. « Les codes de réseau de raccordement des parcs éoliens au réseau électrique ». Rapport de Recherche, Division Energie Eolienne – CDER, N25, 2012.
- [30] Bouregbaoui wahiba, Adel warda, « L'impact de la productivité d'énergie renouvelable sur les charges électriques », Thèse de master, UNIVERSITE D'Adrar, 2021.
- [31] FEDDAOUI, Omar, TOUFOUTI, Riad, et LABED, Djamel. « Modélisation et commande d'un système d'énergie hybride photovoltaïque Éolien Diesel avec batteries de stockages ». 2021. Thèse de doctorat. Université Des Frères Mentouri De Constantine 1.
- [32] ELMAJDOUB, Mohammed Amine, LAMARI, Raouf, et al. « Modélisation et commande d'un système éolienne ». 2020. Thèse de doctorat. Université Ahmed Draia-ADRAR.
- [33] SAMI, KAHLA. « Modélisation et commande d'un système éolienne ». 2018. Thèse de doctorat. Université 8 mai 1945 de Guelma.
- [34] CHELALI, BENACHIBA et HOCINE, CHEGHIB. « Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille ». 2015, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [35] BENALI, A. « Nouvelles Exigences Techniques pour l'Intégration des Energies Renouvelables au Réseau Electrique ». *The First International Conference on Energy Transition and Security*, May 22-24, Adrar, Algeria, 2022.
- [36] MARIH, Salah. « Optimisation d'un parc éolien en vue de son intégration au réseau électrique algérien ». Thèse de doctorat. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis. 2020.
- [37] BELKACHE, Idir. « Simulation et optimisation des échangeurs thermiques dans une tour solaire ». 2018. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

Résumé

Le fort développement qu'a connu l'énergie électrique en générale et l'énergie éolienne en particulier cette dernière décennie à l'échelle internationale devient un vrai challenge. Cette croissance a été rendue possible grâce à divers facteurs qui ont guidés les volontés de politique énergétique en faveur de cette énergie. La principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité. Il est donc important d'évaluer l'impact d'intégration des fermes éoliennes dans les réseaux électriques.

Après un rappel des concepts et notions générale sur l'énergie renouvelable et le fonctionnement de système éolien, ce travail dresse un état de l'art sur l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques ainsi l'impact d'un parc éolienne sur un système électro- énergétique, et sur sa stabilité de tension ; Cette analyse est réalisée à partir d'un programme de Simulink sous environnement Matlab, et PowerWorld simulator). Les simulations effectuées consiste à modéliser les différentes technologies de la production éolienne, afin de d'étude le comportement et les contraintes rencontrées lors de l'intégration d'un éolien dans un réseau électrique.

Mots Clés : Energie Eolienne, Modélisation, Réseaux Electriques, Intégration d'éolien.

ملخص

أصبح التطور الكبير الذي شهدته الطاقة الكهربائية بشكل عام وطاقة الرياح بشكل خاص خلال العقد الماضي على المستوى الدولي تحديًا حقيقيًا. أصبح هذا النمو ممكنًا بفضل العوامل المختلفة التي وجهت إرادة سياسة الطاقة لصالح هذه الطاقة. السمة الرئيسية للرياح هي تقلبها. لذلك من المهم تقييم تأثير دمج مزارع الرياح في الشبكات الكهربائية.

بعد تذكير بالمفاهيم العامة حول الطاقة المتجددة وتشغيل أنظمة طاقة الرياح ، يهدف هذا العمل الى سرد الحالة العامة في دمج طاقة الرياح في الشبكات الكهربائية بالإضافة إلى تأثير مزرعة الرياح. توربينات الرياح في نظام الطاقة الكهربائية، واستقرار الجهد؛ يتم إجراء هذا التحليل باستخدام برنامج Simulink في بيئة Matlab ومحاكاة PowerWorld). تتكون عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها من نمذجة تقنيات توليد الرياح المختلفة ، من أجل دراسة السلوك والقيود التي يتم مواجهتها عند دمج توربينات الرياح في شبكة كهربائية.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح ، النمذجة ، الشبكات الكهربائية ، تكامل طاقة الرياح.