

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

GOUCHIDA Nouredine

SAOULI Mahmoud

**Thème:**

**Comparaison entre différentes types des  
générateurs éoliennes dans la stabilité d'un réseau  
électrique**

Soutenu publiquement

Le : 04 /06/2017

Devant le jury :

Mr GUEHRAR Youcef

MA (A) Président

UKM Ouargla

Mr BOUHADOUZA Boubekour

MA (A) Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

Mr MEGHNI Billel

MC (B) Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2016/2017



# Remerciements

*Nous remercions, ﷻ pour le tout de nous  
avoir donnés*

*Nous exprimons toute notre gratitude à  
l'encadreur **Mr. Bouhadouza Boubekeur** pour  
l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience  
et sa persévérance dans le suivi.*

*Nous adressons également nos remerciements, à  
tous nos enseignants du Département de Génie  
Electrique de l'université de **KASDI MERBAH  
OUARGLA**, qui nous ont donné les bases de la  
science.*

*Nous remercions très sincèrement, les membres de  
jury d'avoir bien accepter de juger ce travail.*

*Nos remerciements vont enfin à toute personne  
qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration  
de ce travail.*



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail, à mes parents, à mes frères, à tous mes amis, à tous mes collègues, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*

*SAOULI MAHMOUD*



# *Dédicace*

*Je dédier ce mémoire*

*à mon père*

*à ma mère*

*à mes frères*

*Gouchida noureddine*

**Sommaire** ..... (I)  
**Liste des figures** ..... (IV)  
**Liste des tableaux** ..... (VI)  
**Listes des Acronymes et Symboles** ..... (VII)  
**Introduction Générale** ..... (01)

**CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes étudiés**

I.1.Introduction ..... (03)  
I.2.Energie renouvelables ..... (03)  
I.3.Energie éolienne ..... (04)  
    I.3.1.Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne ..... (04)  
    I.3.2.Définition de l'énergie éolienne ..... (05)  
    I.3.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne ..... (06)  
I.4.Production éolienne ..... (06)  
    I.4.1.Evolution de la production mondiale en énergies éolienne ..... (06)  
    I.4.2.Production éolienne en Algérie ..... (09)  
I.5.Principaux composants d'une éolienne ..... (10)  
I.6.Les différents types d'éoliennes ..... (11)  
    I.6.1.Eolienne à axe vertical ..... (12)  
        I.6.1.1.Trainée différentielle ..... (12)  
        I.6.1.2.Variation cyclique d'incidence ..... (12)  
    I.6.2. Eoliennes à axe horizontal ..... (13)  
I.7.Différentes technologies d'éoliennes ..... (14)  
    I.7.1.Les éoliennes à vitesse fixe ..... (14)  
        I.7.1.1.Principe générale ..... (14)  
        I.7.1.2.Les éoliennes à décrochage aérodynamique ..... (15)  
        I.7.1.3.Les éoliennes à pales orientables ..... (16)  
    I.7.2.Les éoliennes à vitesse variable ..... (18)  
        I.7.2.1.Principe ..... (18)  
        I.7.2.2.Intérêt de la vitesse variable ..... (19)  
    I.7.3.Comparaison entre les générateurs éoliens (vitesse fixe et variable).....(19)

## SOMMAIRE

I.8. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	(21)
I.8.1.Loi de Betz .....	(21)
I.8.2.Production d'énergie mécanique .....	(23)
I.9. Stabilité des réseaux électriques .....	(24)
I.9.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques .....	(25)
I.9.2. Stabilité de l'angle de rotor .....	(25)
I.9.2.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) ...	(26)
I.9.2.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire) ...	(26)
I.9.3. Stabilité de tension .....	(27)
I.9.3.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations .....	(27)
I.9.3.2. Stabilité de tension aux petites perturbations .....	(27)
I.9.4. Stabilité de fréquence .....	(28)
I.10.Conclusion .....	(28)

## CHAPITRE II : Simulation Et Analyse Des Résultats Du Système Etudie

II.1.Introduction .....	(29)
II.2.Problématique de l'intégration des éoliennes au réseau .....	(29)
II.2.1. Impacts sur le fonctionnement des protections .....	(30)
II.2.2. Impacts sur le plan de tension .....	(30)
II.2.3.Impacts sur la fréquence .....	(30)
II.2.4.Comportement sur creux de tension .....	(30)
II.3. Outils de simulation .....	(31)
II.3.1. Méthode de Newton-Raphson .....	(32)
II.3.2. Utilisation de PSAT .....	(33)
II.3.3. Analyse de la stabilité .....	(33)
II.3.3.1. Critère de stabilité .....	(33)
II.3.3.2. Calcul du temps critique d'élimination du défaut .....	(33)
II.4. Réseau test .....	(34)

## SOMMAIRE

II.5. Influence de l'intégration de source éolienne .....	(35)
II.5.1.Réseau sans source éolienne .....	(35)
II.5.2.Réseau avec éolienne .....	(37)
II.6.L'effet d'emplacement des éolienne et leur taux de pénétration sur la stabilité de système .....	(41)
II.7. Conclusion .....	(45)
<b>Conclusions générales</b> .....	(46)
<b>Annexe : les paramètres de l'éolienne</b> .....	(47)
<b>Références bibliographiques</b> .....	(54)

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure (I.1)</b> Différents types des énergies renouvelables .....	(04)
<b>Figure (I.2)</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	(05)
<b>Figure (I.3)</b> Principaux organes du système de conversion éolien .....	(06)
<b>Figure (I.4)</b> Puissance éolienne cumulée dans le monde depuis 1995 (en MW) .....	(08)
<b>Figure (I.5.A)</b> Répartition mondiale du marché éolien en 2015* .....	(09)
<b>Figure (I.5.B)</b> Répartition de la puissance éolienne mondiale fin 2015* .....	(09)
<b>Figure (I.6)</b> Carte du potentiel éolien en Algérie .....	(10)
<b>Figure (I.7)</b> Composantes et différents éléments d'une éolienne .....	(11)
<b>Figure (I.8)</b> Exemples d'éoliennes à axes vertical .....	(12)
<b>Figure (I.9)</b> Principe de la trainée différentielle .....	(12)
<b>Figure (I.10)</b> principe de l'incidence variable .....	(13)
<b>Figure (I.11)</b> Configurations à axe horizontale .....	(14)
<b>Figure (I.12)</b> Eolienne à vitesse fixe .....	(15)
<b>Figure (I.13)</b> Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone .....	(15)
<b>Figure (I.14)</b> Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique) .....	(16)
<b>Figure (I.15)</b> Génération à puissance électrique constante (pales orientables) .....	(17)
<b>Figure (I.16)</b> Exemple de caractéristique mesurée d'une éolienne à puissance constante située à Dunkerque .....	(17)
<b>Figure (I.17)</b> Eoliennes à vitesse variable .....	(18)
<b>Figure (I.18)</b> Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent .....	(18)
<b>Figure (I.19)</b> Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent .....	(19)
<b>Figure (I.20)</b> Tube de courant autour d'une éolienne .....	(21)
<b>Figure (I.21)</b> Coefficient de puissance .....	(22)



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure (I.22)</b> Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .....	(22)
<b>Figure (I.23)</b> Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné .....	(24)
<b>Figure (I.24)</b> Classification des différents types de stabilité d'un système électrique .....	(25)
<b>Figure (II.1)</b> Caractérisation du creux de tension .....	(31)
<b>Figure (II.2)</b> Interface de PSAT .....	(31)
<b>Figure (II.3)</b> Réseau test IEEE 30 .....	(34)
<b>Figure (II.4)</b> Angle relatives des générateurs .....	(35)
<b>Figure (II.5)</b> fréquences des générateurs .....	(36)
<b>Figure (II.6)</b> tensions de source et défaut .....	(36)
<b>Figure (II.7)</b> fréquence des générateurs synchrones .....	(37)
<b>Figure (II.8)</b> angles relatives des machines synchrones .....	(38)
<b>Figure (II.9)</b> tension de sources et jeux de barres .....	(38)
<b>Figure (II.10)</b> Fréquences des générateurs (Hz) .....	(39)
<b>Figure (II.11)</b> Angle rotorique relatives (rad) .....	(39)
<b>Figure (II.12)</b> Tensions de sources ainsi de JB's défaut et adjacents .....	(40)
<b>Figure (II.13)</b> CCT pour l'insertion des éoliennes .....	(40)
<b>Figure (II.14)</b> CCT en présence des types éoliens .....	(42)
<b>Figure (II.15)</b> CCT de générateur pour différent puissance éoliennes .....	(43)
<b>Figure (II.16)</b> Comparaison des vitesses rotoriques de la génératrice relie au JB11 pour les deux types d'éolienne .....	(44)

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau (I.1)</b> Puissance éolienne installée dans le monde fin 2015* (en MW) .....	(07)
<b>Tableau (I.2)</b> Avantages et inconvénients des différentes éoliennes .....	(20)
<b>Tableau (II.1)</b> emplacement des générateurs dans le réseau IEEE 30 .....	(35)
<b>Tableau (II.2)</b> CCT pour l'insertion des éoliennes .....	(40)
<b>Tableau (II.3)</b> CCT pour différent générateur emplacement de défaut .....	(41)
<b>Tableau (II.4)</b> CCT de générateur pour différent puissance éoliennes .....	(43)

## LISTES DES ACRONYMES ET SYMBOLES

### Acronymes :

SCE	Système de Conversion Eolien
MADA	Machine Asynchrone a Double Alimentation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PSAT	Power System Analysis Toolbox
CCT	Critical Clearing Time
SEE	Systèmes Electro Energétiques
$T_d$	Temps de Défaut
JBs	Jeu De Barre

### Symboles :

$V_k$	Tension au jeu de barres k [V]
$Y_{kn}$	L'admittance de la branche kn [S]
$P_k$	La puissance active au jeu de barres k [W]
$\delta_i$	L'angle rotorique ou différentiel de la machine i. (deg)
$P_i$	La puissance active du jeu de barres i
$Q_i$	La puissance réactive du jeu de barres i.
$\omega_i$	La vitesse angulaire de la machine i. (rad / s)

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable", cette énergie est l'énergie éolienne. Elle a été l'une des croissances les plus rapides de sources d'énergie dans le monde.

Ces dernières années, plusieurs pays dans le monde se sont tournés vers l'énergie éolienne comme la Chine le leader mondial avec une puissance éolienne installée avec 145GW, depuis cette année la puissance cumulée de l'Union européenne 141,7GW, les États-Unis et l'Allemagne, autres pays très actifs, sont dans une position intermédiaire avec une puissance cumulée respective de 74,5GW et 44,9GW, l'Inde 25,1GW, l'Espagne avec 23GW, le Royaume-Uni 13GW, en 2015.

Dans ce mémoire, notre étude s'intéresse à la filière éolienne, la comparaison entre différents types des générateurs éoliennes et leur intégration sur le réseau électrique notamment en ce qui concerne la qualité de l'électricité plus précisément la stabilité du réseau.

Dans cette note, nous choisissons le modèle de réseau dans lequel on applique par défaut et nous allons essayer de changer le temps par défaut d'isolement d'erreur de temps d'isolement critique pour chaque événement qui nous permettra de comparer et juger de l'impact des sources d'intégration éolienne dans chaque compte de cas.

Le modèle d'application et les différents tests que nous allons effectuer sont réalisés avec un logiciel PSAT 2.1.9/MATLAB.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le système éolien et énergie renouvelable, à l'historique d'énergie éolienne, et différents types des éoliennes, et quelques définitions de stabilité.

## INTRODUCTION GENERALE

Dans le deuxième chapitre, on présente le logiciel de simulation (PSAT 2.1.9/MATLAB.), ainsi que le modèle de réseau IEEE 30 jeux de barre (réseau teste) en présence des différents type éoliennes, par la suite les résultats de toutes les étapes de simulations seront analyse en faisant des comparaisons entre eux afin en tirer quelques conclusions.

# **Chapitre I :**

# **Généralité Sur Les**

# **Systemes Etudie**

## I.1.Introduction

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. 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 [01].

Dans ce chapitre, on présente la définition des énergies renouvelables, généralité de système éolienne, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production de l'énergie éolienne dans le monde, ainsi les générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

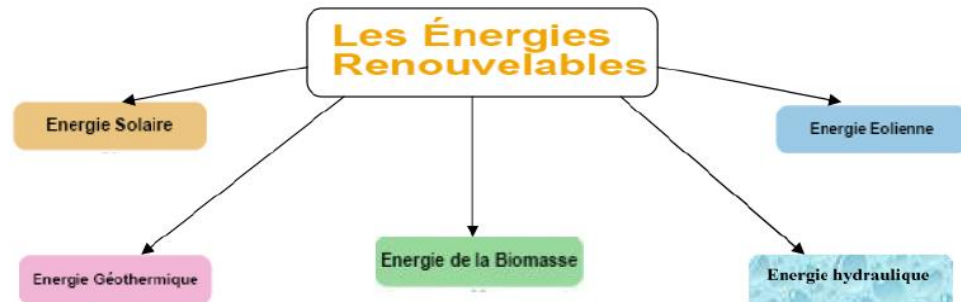
## I.2.Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne; la lumière solaire excitant les photopiles; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie [02].

On distingue plusieurs types d'énergie renouvelable:

- L'énergie solaire: thermique et photovoltaïque
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique : principalement exploitable par des centrales hydroélectriques
- La biomasse
- La géothermie

Et autres, la figure (I.1) représente quelques types les plus connus.



**Figure (I.1)** Différents types des énergies renouvelables

### I.3.Énergie éolienne

#### I.3.1.Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [03].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poule La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [02].

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale avec une grande échelle [03].

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début



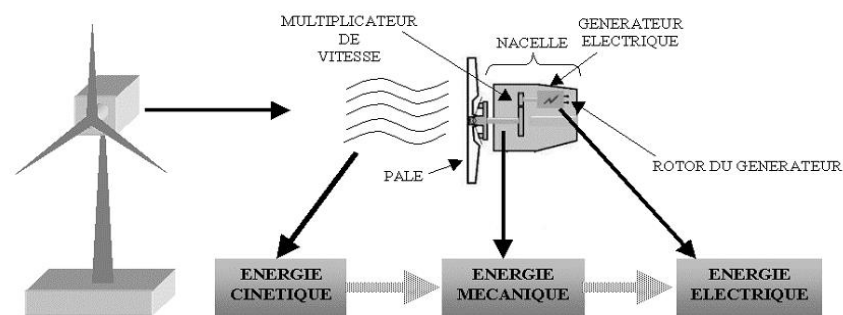
avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985 [03].

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [02].

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [04].

### I.3.2. Définition de l'énergie éolienne

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 (I.2) [05].



**Figure (I.2)** Conversion de l'énergie cinétique du vent [06]

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la figure (I.3) [02].

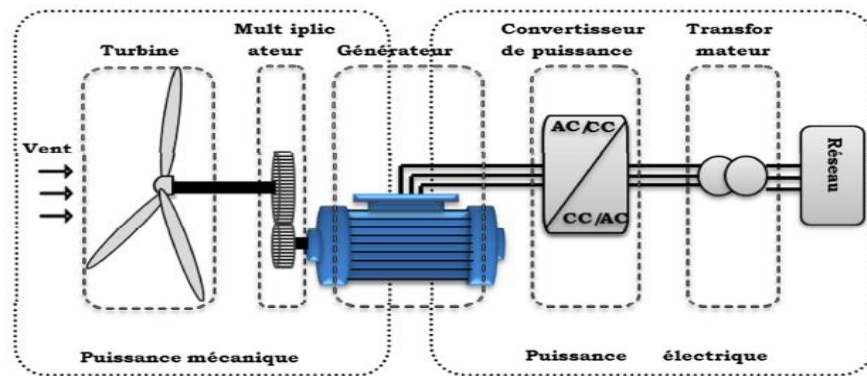


Figure (I.3) Principaux organes du système de conversion éolien [02]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [05].

### I.3.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [06].

## I.4.Production éolienne

### I.4.1.Evolution de la Production mondiale en énergies éolienne

Quelques semaines après la signature à Paris d'un accord historique sur le climat entre 195 pays et délégations nationales, les chiffres du marché mondial de l'éolien confirment que la transition énergétique mondiale est bien en ordre de marche [07].

Selon les premières données disponibles, l'industrie éolienne mondiale aurait installé au moins 62 732 MW en 2015, soit 22 % de plus qu'en 2014. La formidable performance du

marché chinois (30,5 GW), désormais au cœur de la croissance mondiale, la levée des incertitudes aux Etats-Unis (8,6 GW) et la croissance continue des marchés émergents comme le Brésil (2,8 GW), l'Inde (2,6 GW) ou la Turquie (1 GW) expliquent en grande partie les très bons chiffres du marché mondial de l'éolien (tableau I.1) [07].

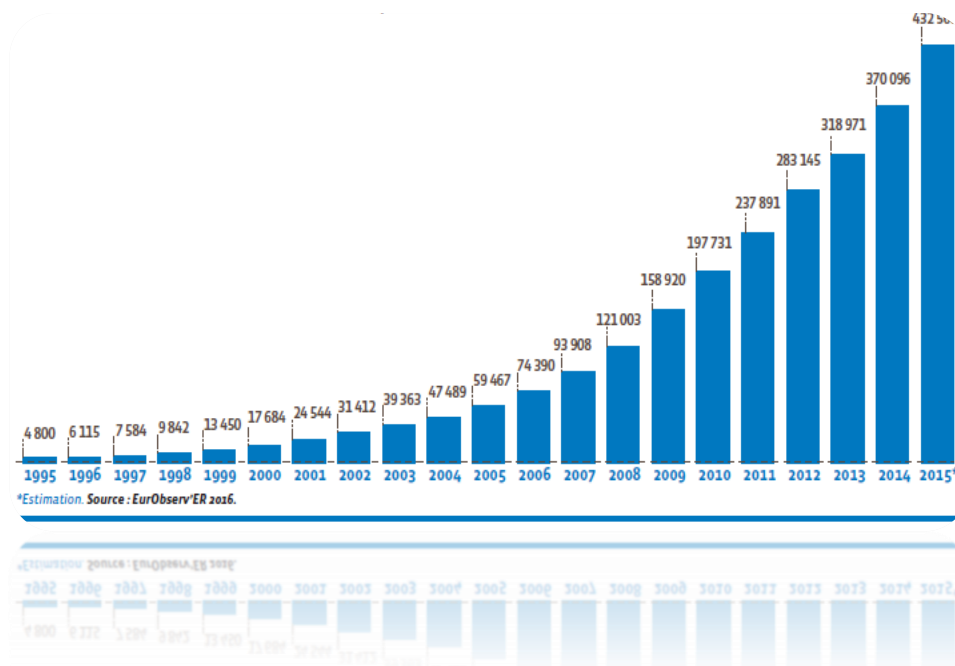
**Tableau (I.1)** Puissance éolienne installée dans le monde fin 2015\* (en MW) [07]

	2014	2015	Puissance installée en 2015
<b>Union européenne</b>	<b>129 459,6</b>	<b>141 718,2</b>	<b>12 518,3</b>
<b>Reste de l'Europe</b>	<b>5 192,4</b>	<b>6 193,2</b>	<b>1 005</b>
<b>Total Europe</b>	<b>134 652</b>	<b>147 911,4</b>	<b>13 523,3</b>
<b>États-Unis</b>	<b>65 877</b>	<b>74 472</b>	<b>8 598</b>
<b>Canada</b>	<b>9 694</b>	<b>11 200</b>	<b>1 506</b>
<b>Mexique</b>	<b>2 359</b>	<b>3 073</b>	<b>714</b>
<b>Total Amérique du Nord</b>	<b>77 930</b>	<b>88 745</b>	<b>10 818</b>
<b>Chine</b>	<b>114 604</b>	<b>145 104</b>	<b>30 500</b>
<b>Inde</b>	<b>22 465</b>	<b>25 088</b>	<b>2 623</b>
<b>Japon</b>	<b>2 794</b>	<b>3 038</b>	<b>245</b>
<b>Autres pays d'Asie</b>	<b>2 105</b>	<b>2 343</b>	<b>238</b>
<b>Total Asie</b>	<b>141 968</b>	<b>175 573</b>	<b>33 606</b>
<b>Afrique &amp; Moyen Orient</b>	<b>2 536</b>	<b>3 289</b>	<b>753</b>
<b>Amérique latine</b>	<b>8 568</b>	<b>12 220</b>	<b>3 652</b>
<b>Région Pacifique</b>	<b>4 442</b>	<b>4 822</b>	<b>380</b>
<b>Total monde</b>	<b>370 096</b>	<b>432 560,4</b>	<b>62 732,3</b>

La montée en puissance de l'éolien est une tendance de fond. En l'espace de deux décennies, la puissance cumulée dans le monde a déjà été multipliée par 90 ; figures (I.4) pour atteindre 432 560 MW. Le parc mondial a même plus que doublé depuis le début des années 2010. Pour donner un ordre d'idée de ce que représente ce parc, en prenant en compte un facteur de charge moyen de 2 200 heures par machine, on obtient une production de plus de 950 TWh, soit l'équivalent de la consommation annuelle d'électricité du Japon [07].

Les principaux pays consommateurs d'électricité sont également les premiers investisseurs dans l'énergie éolienne. La Chine est toujours le seul pays à disposer d'une puissance installée supérieure à 100 GW (145,1 GW fin 2015) et devance même depuis cette année la puissance cumulée de l'Union européenne (141,7 GW fin 2015). Les Etats-Unis et l'Allemagne, autres pays très actifs, sont dans une position intermédiaire avec une puissance cumulée respective de 74,5 GW et 44,9 GW [07].

Ils sont suivis par cinq autres pays affichant une puissance supérieure à 10 GW : l'Inde (25,1 GW), l'Espagne (23 GW), le Royaume-Uni (13 GW), ainsi que le Canada et la France, les deux nouveaux entrants dans ce club avec des parcs respectifs de 11,2 GW et de 10,3 GW. Ils seront très certainement rejoints dès l'an prochain par le Brésil (aujourd'hui à 8,7 GW). Une répartition régionale montre que l'Asie concentre désormais 40,6 % de la puissance éolienne installée dans le monde figure (I.5), et creuse l'écart avec l'Europe (34,2 %) et l'Amérique du Nord (20,5 %). En 2015, une éolienne sur deux a été installée en Asie (53,6 %), contre à peine plus de 2 sur 10 en Europe (21,6 %) et moins de 2 en Amérique du Nord (17,2 %) [07].



**Figure (I.4)** Puissance éolienne cumulée dans le monde depuis 1995 (en MW) [07]

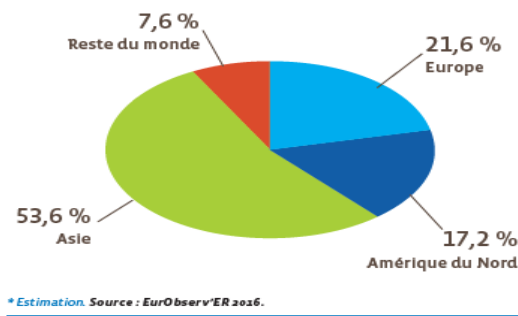


Figure (I.5.A) Répartition mondiale du marché éolien en 2015\* [07]

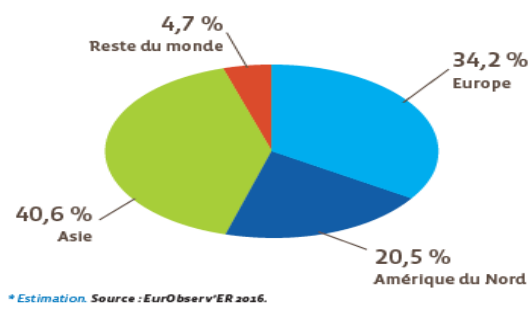


Figure (I.5.B) Répartition de la puissance éolienne mondiale fin 2015\* [07]

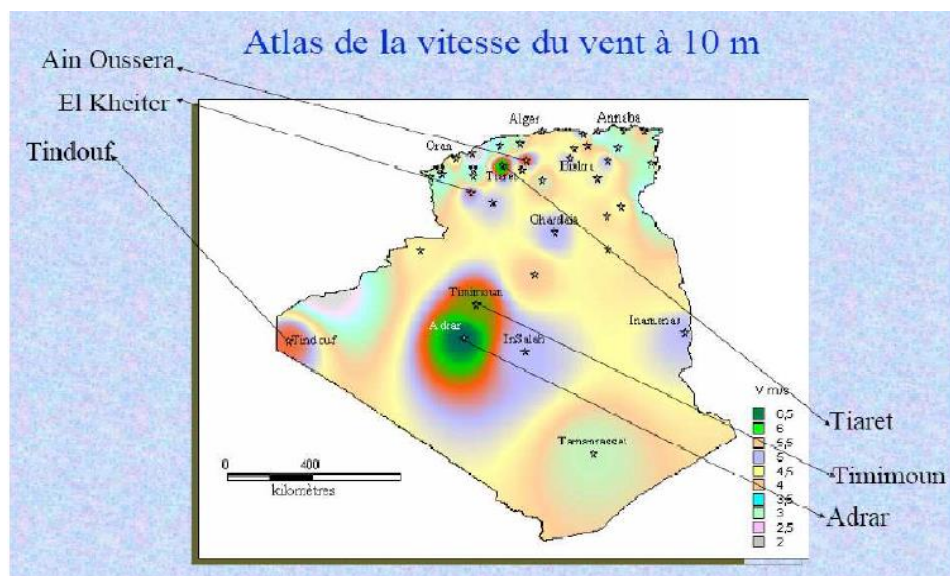
#### I.4.2. Production éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs :

Le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays [08].

La carte représentée en figure (I.6) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence

de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bijaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bijaia au Nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins. Il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté. Des régions telles que Biskra, et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année [08].



**Figure (I.6)** Carte du potentiel éolien en Algérie [08]

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées ou de permettre aux régions qui baignent dans le vent d'avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase de l'étude et d'autres commencent à voir le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW par le groupe Français Vergnet, et les constructeurs des aérogénérateurs (MADA) est les Espagnol.

### **I.5.Principaux composants d'une éolienne**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux :

### a. Le mât

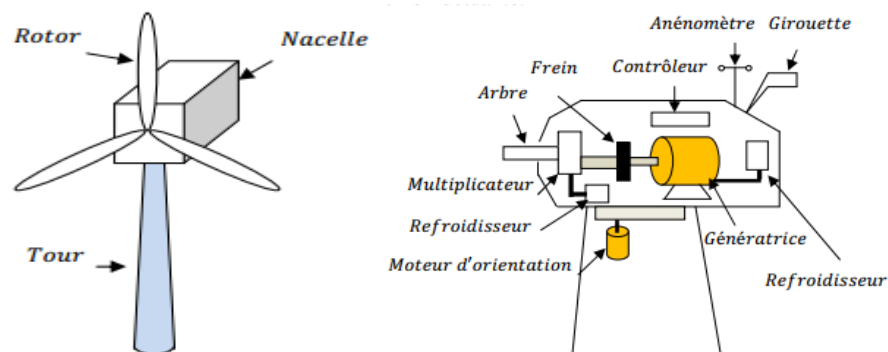
Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien [01].

### b. Les pales

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [01].

### c. La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [05].



a- Eolienne à trois pales

b- Eléments d'une nacelle

**Figure (I.7)** Composantes et différents éléments d'une éolienne [03]

## I.6. Différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types :

### I.6.1.Éolienne à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [06].



Figure (I.8) Exemples d'éoliennes à axes vertical [08]

#### I.6.1.1.Trainée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machines tel qu'il est schématisé dans la figure (I.9) est identique à celui d'un anémomètre : l'éolienne est munie de pales de forme creuse, sur lesquelles des efforts d'intensités différentes et de sens opposés sont exercés par le vent. Il en résulte donc un couple moteur qui fait tourner le rotor de l'éolienne [08].

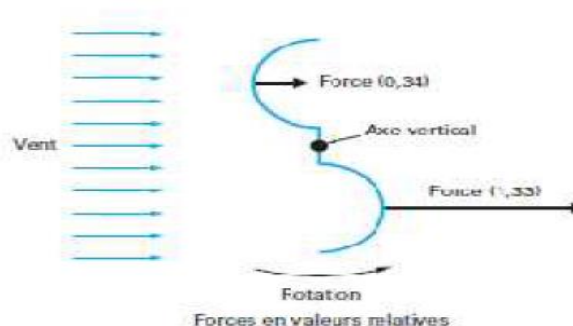


Figure (I.9) Principe de la trainée différentielle [08]

#### I.6.1.2.Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables figure (I.10).



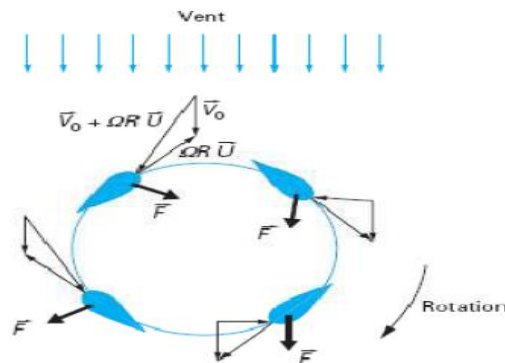


Figure (I.10) Principe de l'incidence variable [08]

Avec :

- $\bar{V}_0$  : Vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne
- $\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation des pales
- $R$  : Rayon de la pale
- $\bar{U}$  : Vecteur unitaire tangent de la pale.

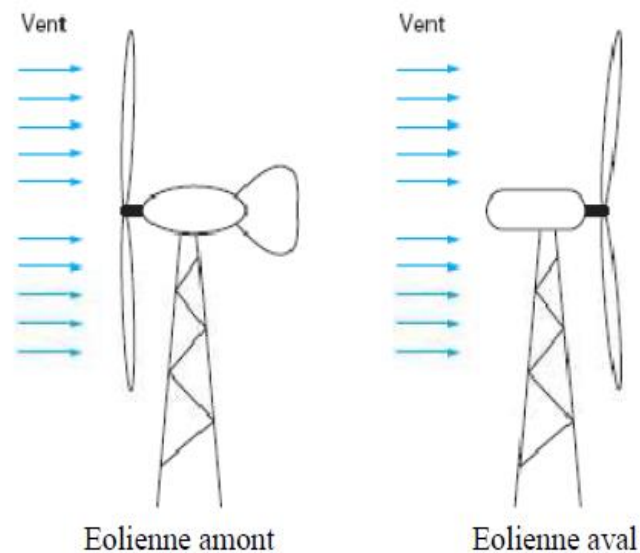
La combinaison de ces forces génère un couple moteur, Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Cependant, le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, elle fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine. En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine), ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine [08].

### I.6.2. Eoliennes à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « **Amont** », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et inversement, les éoliennes « **aval** ».

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule «**amont**» requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration «**aval**» autorise l'utilisation de rotors plus flexible. Par ailleurs, dans ce cas d'une machine «**amont**», l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine «**aval**». Enfin, une machine «**aval**» est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne «**amont**» doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration «**amont**» [08].



**Figure (I.11)** Configurations à axe horizontale [08]

## I.7. Différentes technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles à vitesse constante et celles à vitesse variable.

### I.7.1. Eoliennes à vitesse fixe

#### I.7.1.1. Principe générale

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse  $\Omega_{\text{mec}}$  est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entraînant tend à accélérer la vitesse de la génératrice figure (I.12).

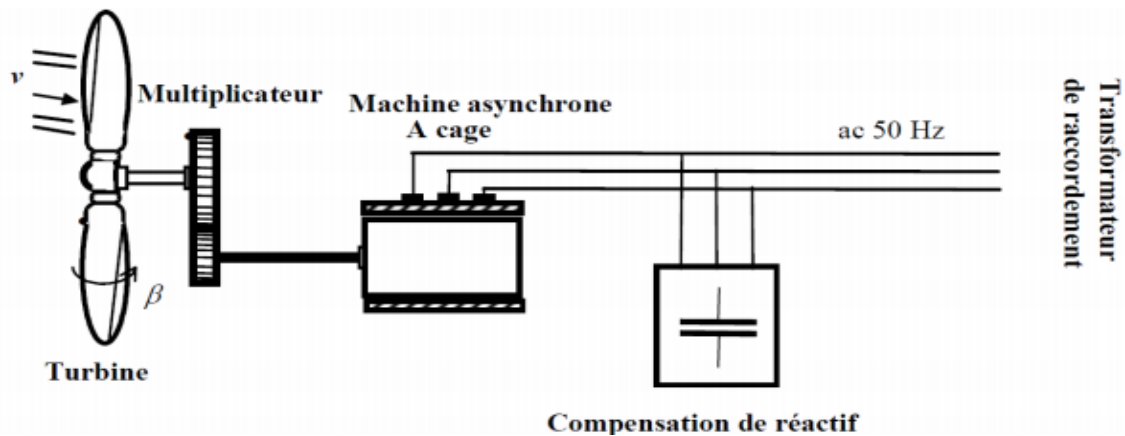


Figure (I.12) Eolienne à vitesse fixe [09]

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique ( $\Omega_{mec}$ ) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme  $\Omega_s = 1500$  tr/mn, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [10] figure (I.13).

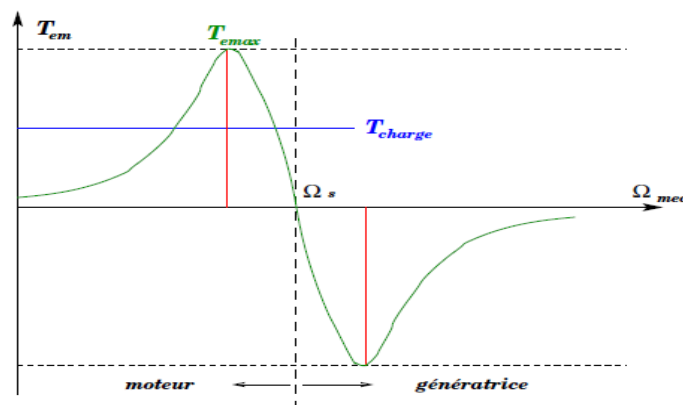


Figure (I.13) Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone [10]

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe :

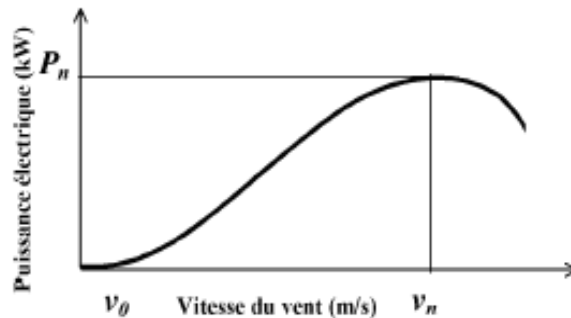
- Les éoliennes à décrochage aérodynamique
- Les éoliennes à pales orientables

### I.7.1.2. Eoliennes à décrochage aérodynamique

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en générale à la puissance nominale de la

machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent figure (I.14) [10].

On définit :



**Figure (I.14)** Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique) [10]

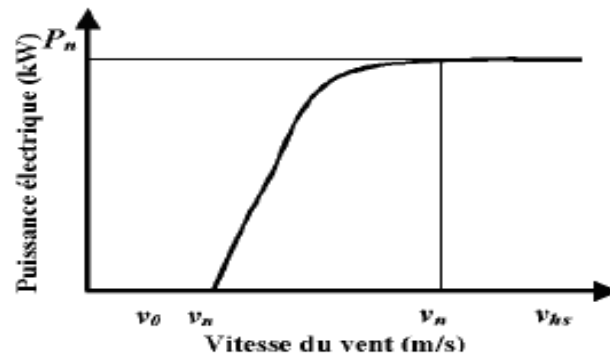
- $P_n$  : la puissance nominale de l'éolienne.
- $v_0$  : la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.
- $v_n$  : la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible. Pour les machines de forte puissance, on trouve également le système « Stall actif » [10].

Le décrochage aérodynamique est alors obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système à orientation des pales qui est maintenant présenté.

### I.7.1.3 Eoliennes à pales orientables

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure  $v_n$  figure (I.15) [11].

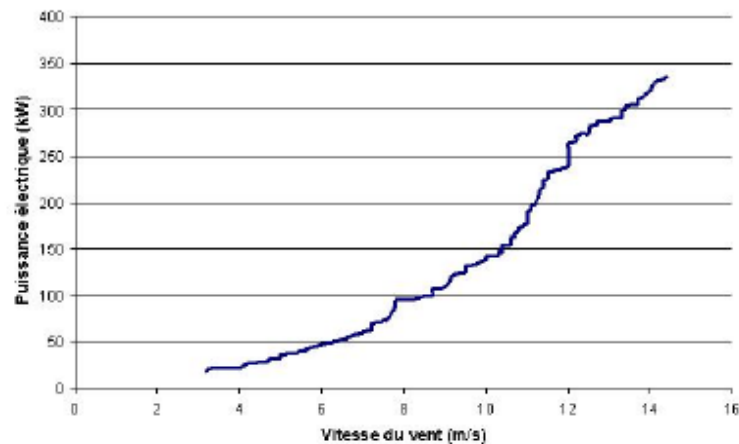


**Figure (I.15)** Génération à puissance électrique constante (pales orientables) [10]

Avec :

- $v_f$  : la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.
- $v_{hs}$  : la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

La figure (I.16) montre la caractéristique mesurée de la puissance électrique produite en fonction de la vitesse du vent. Cette dernière est obtenue à partir des fichiers de vents enregistrés par E. Vasseur et JM. Grave de NORELEC (Verquin) en 1997 sur une éolienne de 300 kW de la ferme éolienne de Dunkerque. Les mesures de vitesses sont celles enregistrées au sommet de l'éolienne. On constate à partir de cette caractéristique que la puissance mesurée est exponentielle en fonction de la vitesse du vent, pour atteindre une valeur maximale d'environ 335 kW. L'orientation des pales n'est pas caractérisée dans ce cas.



**Figure (I.16)** Exemple de caractéristique mesurée d'une éolienne à puissance constante située à Dunkerque [10]

I.7.2. Eoliennes à vitesse variable

I.7.2.1.Principe

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure (I.17) la configuration de la figure (I.17.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure (I.17.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

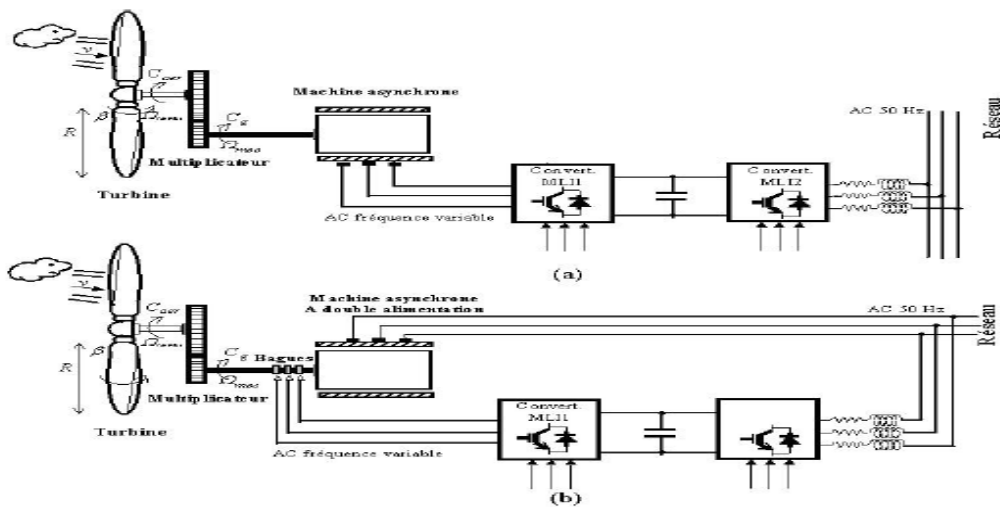


Figure (I.17) Eoliennes à vitesse variable [08]

Nous présentons sur la figure (I.18) la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de Schelle de 1.5 MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s. L'orientation des pales est parfaitement réalisée dans ce cas.

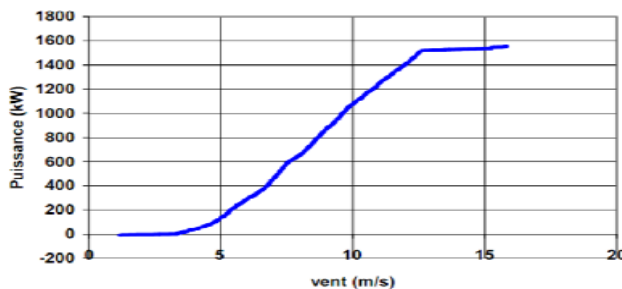
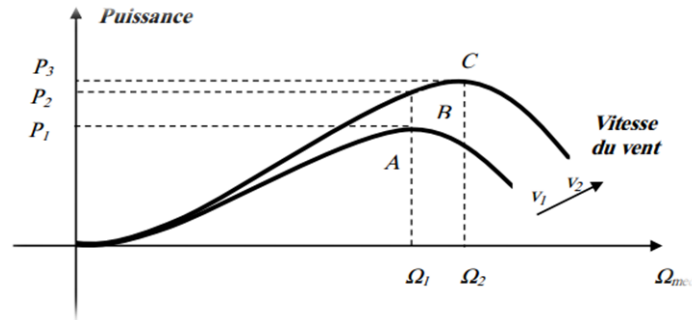


Figure (I.18) Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent [12]

### I.7.2.2. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.19).



**Figure (I.19)** Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique [01]

Pour une vitesse de vent  $v_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$  ; on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $v_1$  à  $v_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [01].

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ( $\Omega_{ref}$ ) calculée pour maximiser la puissance extraite.

### I.7.3. Comparaison entre les générateurs éoliens (à vitesse fixe et variable)

Les machines utilisées pour la production de l'énergie électrique aux systèmes éoliennes ont des avantages et des inconvénients. Notamment, le rendement électrique, le coût et l'habileté quotidienne de produire de l'énergie électrique avec un minimum de perte d'énergie comme il est signalé au tableau (I.2) qui montrent les différentes caractéristiques des différentes éoliennes.

**Tableau (I.2)** Avantages et inconvénients des différentes éoliennes [12]

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<p><b>MAS</b> Vitesse fixe</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Machine robuste</li> <li>-faible coût</li> <li>-pas d'électronique de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-puissance non optimisée</li> <li>-Maintenance boîte de vitesse</li> <li>-Magnétisation de la machine imposée par le réseau</li> </ul>
<p><b>MADA</b> Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnement à vitesse variable</li> <li>-Puissance extraite optimisée</li> <li>-Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale</li> <li>-Machine standard</li> <li>-Connexion de la machine plus facile à gérer</li> <li>-Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Maintenance boite de vitesse</li> <li>-Prix de l'électronique de puissance.</li> <li>-Contrôle-commande complexe</li> <li>-Contact glissant bagues - balais</li> </ul>
<p><b>MSAP</b> Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse</li> <li>-puissance extraite optimisée pour les vents faibles.</li> <li>-Connexion de la machine facile à gérer.</li> <li>-Possibilité d'absence de boîte de vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-prix de l'électronique de puissance</li> <li>-Machine spécifique</li> <li>-Grand diamètre de machine</li> <li>-Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice</li> </ul>



## I.8. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

### I.8.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.20) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval [05]. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S (V_1+V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (I.1):

$$P_m = \frac{\rho S (V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$

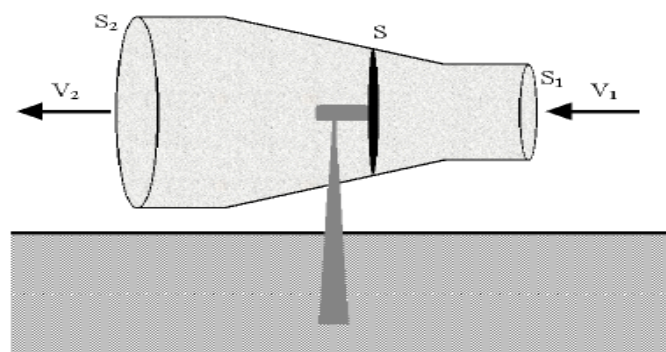


Figure (I.20) Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \tag{I.5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I.21), on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mt}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [05].

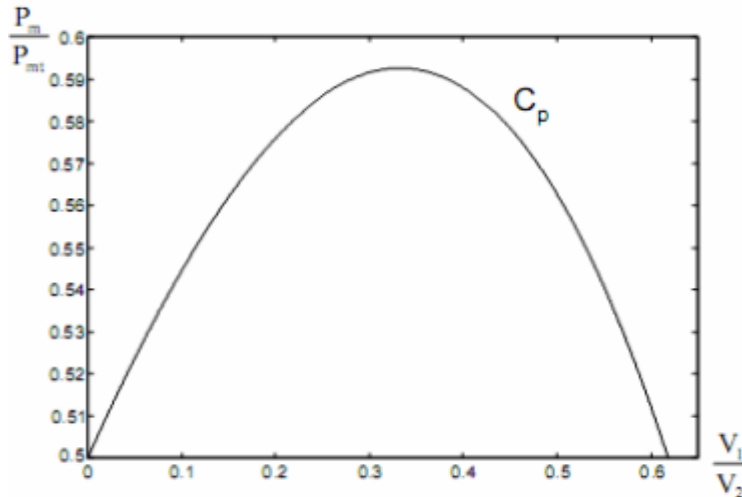


Figure (I.21) Coefficient de puissance [09]

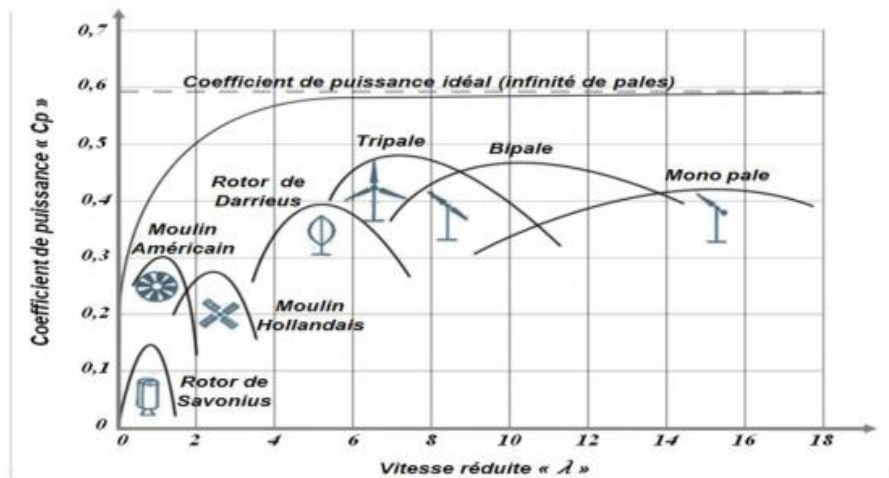


Figure (I.22) Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [13]

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance figure (I.22) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [05].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance figure (I.22) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [05].

### I.8.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{I.6})$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (\text{I.7})$$

- $C_p$  : coefficient de puissance
- $\Omega_1$  : vitesse de rotation avant multiplicateur
- $R$  : rayon de l'aérogénérateur.

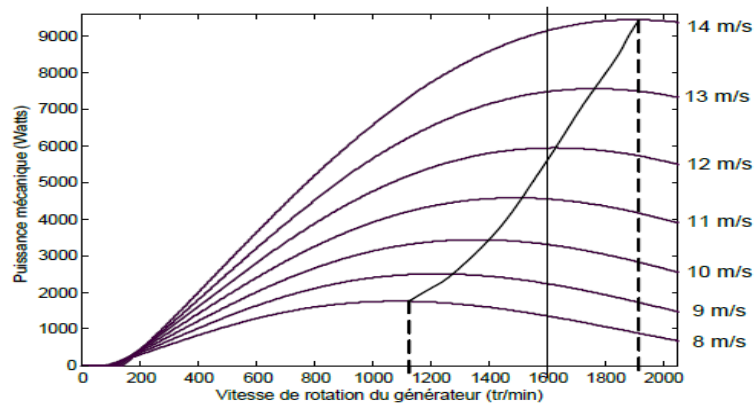
Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $K$ , la puissance mécanique  $P_{mg}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$\Omega_2$  : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent figure (I.23) [05].



**Figure (I.23)** Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [05]

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure (I.23) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

### I.9. Stabilité des réseaux électriques

La stabilité est un problème crucial dans les réseaux électriques depuis les années 1920, beaucoup de blackouts de grande ampleur provoqués par l'instabilité du réseau électrique ont illustré l'importance de ce problème. La stabilité du réseau électrique est semblable à celle de n'importe quel système dynamique et a des principes mathématiques fondamentaux.

La stabilité d'un système de puissance peut être globalement définie comme étant la propriété d'un système d'énergie électrique qui lui permet de rester dans un état d'équilibre d'exploitation dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un nouvel état d'équilibre acceptable après avoir été soumis à une perturbation. Suivant la nature et l'amplitude de la perturbation, on distingue trois types de stabilité [01] figure (I.24):

- La stabilité de tension
- La stabilité de fréquence
- La stabilité de l'angle de rotor

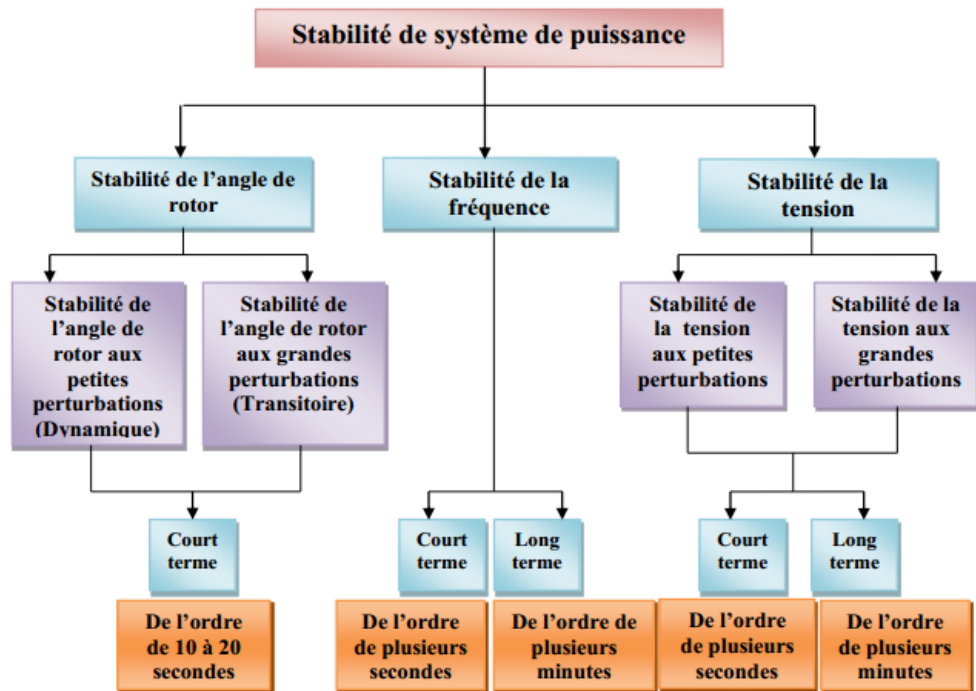


Figure (I.24) Classification des différents types de stabilité d'un système électrique

### I.9.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques

Traditionnellement, le problème de la stabilité consiste à maintenir le fonctionnement synchrone des générateurs du système. Ainsi, pour avoir une production satisfaisante de la puissance électrique, toutes les machines synchrones du système doivent fonctionner en synchronisme. Cet aspect de la stabilité est influencé par les dynamiques de l'angle de rotor de générateur et de la relation puissance-angle [14].

### I.9.2. Stabilité de l'angle de rotor

La stabilité de l'angle de rotor est la capacité des alternateurs d'un réseau électrique interconnecté de rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre le couple électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque alternateur dans le système. L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs.

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un

alternateur, une partie ou tout le réseau. La stabilité aux petites perturbations dépend du point de fonctionnement d'équilibre initial du système ainsi que des caractéristiques dynamiques du système [15].

La stabilité d'angle rotorique peut être caractérisée en termes des deux sous-catégories suivantes :

- Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)
- Stabilité d'angle rotorique de grande perturbation (stabilité transitoire)

### **I.9.2.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)**

La stabilité d'angle rotorique de petite perturbation (ou en petits signaux) est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme sous de petites perturbations. Les perturbations sont considérées comme suffisamment petites pour que la linéarisation des équations du système soit permise aux fins de l'analyse.

La nature de la réponse du système aux petites perturbations dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment à l'exploitation initiale, la force génératrice de transmission du système et le type d'excitation du générateur de grandes commandes utilisées. L'intervalle de temps de la dynamique généralement observée des petites perturbations est de l'ordre de 10 sec à 20 sec après leur apparition.

### **I.9.2.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)**

La stabilité d'angle rotorique de grande perturbation (ou la stabilité transitoire) est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme après une perturbation importante. Le résultat de la réaction du système implique de grandes excursions des angles des rotors des générateurs et est influencée par la relation non-linéaire de la puissance par rapport à l'angle. Elle dépend de l'état initial du système et de la sévérité de la perturbation. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

- Les court-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines,
- La perte d'ouvrages
- La perte de groupes de production.....etc.

Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau (black-out). La stabilité transitoire dépend :

- Du type de perturbation
- De la durée de perturbation
- Du lieu de perturbation
- De la performance des systèmes de protection (relais, disjoncteur ; .....etc)
- Du point de fonctionnement avant défaut.
- Niveau de puissance active
- Topologie du réseau
- Degré d'excitation des machines.
- Des caractéristiques dynamiques.
- Des générateurs
- Des charges
- Des régulateurs et des stabilisateurs mis en place [01].

### **I.9.3. Stabilité de tension**

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques jeux de barres [16]. La stabilité de tension est peut être divisée en deux catégories [14].

#### **I.9.3.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations**

La stabilité de tension en grandes perturbations est la capacité du système à maintenir la tension stable à la suite de grandes perturbations ; telles que les défauts du système ou la perte d'un générateur. Cette capacité est déterminée par la topologie du système, les caractéristiques des charges, et les interactions entre les contrôles continus de tension, les contrôles discrets et les protections [01].

#### **I.9.3.2. Stabilité de tension aux petites perturbations**

La stabilité de tension en petites perturbations est la capacité du système à maintenir les tensions stables lorsqu'il est soumis à de petites perturbations ; telles que des changements

progressifs des charges. Cette forme de stabilité est influencée par les caractéristiques des charges, des contrôles continus de tension et des contrôles discrets à un instant donné. Ce concept est utile pour déterminer, à tout instant, comment les tensions répondront aux petits changements du système [01].

#### **I.9.4. Stabilité de fréquence**

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produites et consommées. En cas de déficit de production, la chute de la fréquence peut être arrêtée par un délestage de charge (en sous-fréquence). Par contre, en cas de surplus de production, la hausse de la fréquence du système est arrêtée par une déconnexion rapide de certaines unités de productions de sorte que l'équilibre production - consommation soit rétabli [16].

#### **I.10. Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un aperçu de l'énergie renouvelable. On présente les généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne, nous avons présenté un bref historique sur les premières utilisations de l'énergie éolienne, définition d'énergie éolienne, et un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éolienne. Ainsi différents types de Générateurs électriques les plus utilisés (Générateur asynchrone à vitesse fixe et variable), et le système de Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Enfin nous avons présenté la Stabilité des réseaux électriques.



**Chapitre II :**  
**Simulation Et**  
**Analyse Des Résultats**  
**Du Système Etudie**

## **II.1. Introduction**

La production de l'énergie électrique par les sources renouvelables à un apport très important dans les dernières années. Car, ils encouragent la production de ce type d'énergie, puisque elle est propre et gratuite (effet de serre, protocole de Kyoto). La production de l'énergie par les éoliennes accélères d'une manière très rapide, tel que l'Allemagne, le Danemark, la chine ...etc., en Algérie, l'éolienne installé au niveau de Adrar a une capacité de 10 MW [17].

Dans ce chapitre on va étudier les différents types des machines utilisées pour la production d'énergie électriques par les sources éolienne, tels que, les machines à vitesse fixe ainsi la machine à vitesse variables. Ces éoliennes ont une influence sur la stabilité de systèmes électriques, comme, l'instabilité de vitesse des machines synchrones (alternateurs) ainsi le système de protection des réseaux électriques lors d'une nouvelle centrale injectée de type asynchrone. Le réseau étudié est un réseau IEEE de 30 jeux de barre, ses données sont déclarés dans l'annexe.

## **II.2. Problématique de l'intégration des éoliennes au réseau**

Les fermes éoliennes sont des sources de production décentralisées, leur pénétration dans le réseau électrique pose certains problèmes. En effet, il est difficile de gérer la prévision de ces sources qui sont très aléatoires par la nature de la vitesse du vent qui est très fluctuante en un temps très court. Cela pose des problèmes qui résident dans l'absence du réglage fréquence-puissance et l'absence du réglage de la tension pour certaines technologies, qui implique la sensibilité aux creux de tension, ce qui engendre une mauvaise qualité de l'énergie transmise au réseau [16]. Les principaux impacts de l'insertion des éoliennes au réseau sont :

- Des impacts sur le fonctionnement des protections dus à la modification des transits de puissance
- Des impacts sur le niveau de tension
- Des impacts sur la fréquence
- Comportement sur creux de tension

### **II.2.1. Impacts sur le fonctionnement des protections**

Le réseau électrique achemine l'électricité des centrales de productions généralement situées sur un réseau de transport vers les consommateurs via le réseau de distribution. Dans ce cas, le transit de puissance est unidirectionnel. L'insertion des éoliennes sur le réseau de distribution peut induire une inversion de sens du flux de puissance, il devient donc bidirectionnel, et c'est ce qui a une influence sur les organes de protection, et de réglage de tension comme les transformateurs réglables en charge [16].

### **II.2.2. Impacts sur le plan de tension**

La puissance active injectée par les éoliennes joue un rôle important dans la modification de la tension. La tension en certains jeux de barres dans le réseau de distribution peut dépasser le seuil supérieur de tension si les éoliennes fonctionnent en pleine puissance en heures creuses, et le seuil inférieur de tensions si les éoliennes sont en panne en heures de pointe. Ainsi, lors de la mise en service d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone, la puissance réactive, nécessaire à la magnétisation de la génératrice consommée provoque une chute de tension au point de connexion [16].

### **II.2.3. Impacts sur la fréquence**

Dans le cas de l'utilisation d'éoliennes à vitesse fixe, l'oscillation de la vitesse de rotation de la génératrice, provoquée lors d'une brusque diminution ou d'une rafale de vent, induit des variations significatives de la fréquence. Pour l'éolienne à vitesse variable reliée au réseau par des convertisseurs de puissance, ces normes sont facilement respectées par l'existence d'un bus continu intermédiaire [10].

### **II.2.4. Comportement sur creux de tension**

Les générateurs éoliens, tout comme la majorité des générateurs décentralisés, sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence. Lors du black-out italien du 28 septembre 2003, 3400 MW de productions décentralisées se sont déconnectés lorsque la fréquence du réseau a atteint 49 Hz. Trois ans plus tard lors de l'incident du 4 novembre 2006 touchant l'ensemble du réseau Européen de l'UCTE, environ 4000 MW d'éolien dans la zone Ouest et environ

6000 MW dans la zone Est se sont également déconnectés lors de la forte variation de fréquence [18].

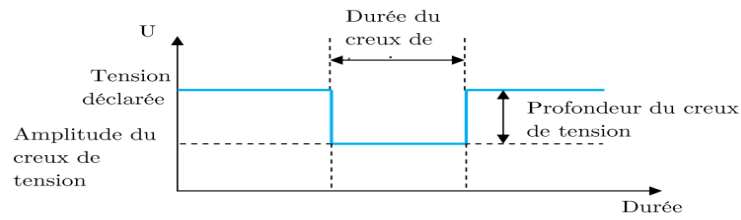
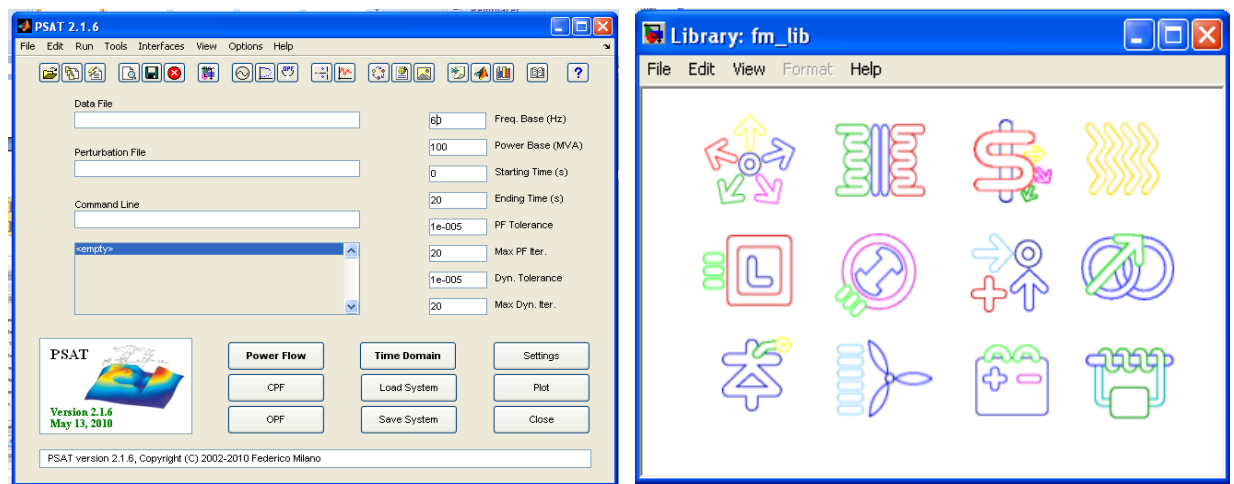


Figure (II.1) Caractérisation du creux de tension

II.3. Outils de simulation

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour l’analyse de la stabilité tels que (MATLAB, EMTP, Etap, Power World, PSAT,... etc). Ces logiciels permettent de nous renseigner sur les différents facteurs d’un réseau électrique et à simuler les différents cas pour avoir les paramètres du réseau. Ces derniers utilisent les mêmes concepts. Dans le présent travail, on a choisi PSAT comme outil de simulation. Développé, en 2001, par FEDERICO MILANO, PSAT est une boîte à outils qui s’exécute sous environnement MATLAB. Elle est dédiée pour l’analyse statique et dynamique et le contrôle des réseaux électriques. PSAT est actuellement dans un stade précoce de développement de ses caractéristiques, ses structures et ses formes de données, mais être partiellement ou complètement changer dans les versions futures. Le PSAT inclut L’écoulement de puissance basé sur la méthode de NEWTON-RAPHSON, L’écoulement de puissance, L’écoulement de puissance optimal, la stabilité de tension ... [19].



(a) fenêtre principale

(b) Bibliothèque de Simulink

Figure (II.2) Interface de PSAT

**II.3.1.Méthode de Newton-Raphson**

Cette méthode est basée sur l’expansion en série de TAYLOR. L’étude de cette méthode commencera avec la résolution d’un problème de deux équations avec deux variables. L’intégration de cette méthode dans le problème de l’écoulement de puissance est comme suit:

Les tensions des jeux de barres et les admittances des lignes sont exprimées sous forme polaire:

$$V_K = |V_K| \angle \delta_K \tag{II.1}$$

$$Y_{Kn} = |Y_{Kn}| \angle \theta_{Kn} \tag{II.2}$$

$$P_K - jQ_K = V_K^* \sum_{n=1}^N \bar{Y}_{Kn} \bar{V}_n = \sum_{n=1}^N \bar{V}_K V_n Y_{Kn} \angle (\theta_{Kn} + \delta_n - \delta_K) \tag{II.3}$$

Donc :

$$P_K = \sum_{n=1}^N \bar{V}_K V_n Y_{Kn} \cos (\theta_{Kn} + \delta_n - \delta_K) \tag{II.4}$$

$$Q_K = -\sum_{n=1}^N \bar{V}_K V_n Y_{Kn} \sin (\theta_{Kn} + \delta_n - \delta_K) \tag{II.5}$$

Comme dans la méthode de GAUSS-SEIDEL, le jeu de barres de référence ne sera pas considéré puisque le module et l’angle de la tension au niveau de ce jeu de barres sont spécifiés.  $P_{et} Q$  sont spécifiées pour tous les jeux de barres sauf le swing bus elles correspondent au vecteur K à partir des équations précédentes :

$$P_K = \sum_{n=1}^N \bar{V}_K \bar{V}_n \bar{Y}_{Kn} \cos (\theta_{Kn} + \delta_n - \delta_K) \tag{II.6}$$

$$Q_K = \sum_{n=1}^N \bar{V}_K \bar{V}_n \bar{Y}_{Kn} \sin (\theta_{Kn} + \delta_n - \delta_K) \tag{II.7}$$

On définit :

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_k &= P_{Kspec} - P_{cal} \\ \Delta Q_k &= Q_{Kspec} - Q_{cal} \end{aligned} \right\} \tag{II.8}$$

Ceci correspond au vecteur  $\Delta K$

Le jacobien est formé à partir des dérivées partielles de  $P$  et  $Q$  par rapport aux variables  $\bar{V}$  et  $\delta$ , les éléments du vecteur  $\Delta \delta_K^{(0)}$  et  $\Delta \bar{V}_K^{(0)}$  sont les corrections à ajouter aux valeurs estimées  $\delta_K^{(0)}$  et  $\bar{V}_K^{(0)}$  pour obtenir  $\delta_K^{(1)}$  et  $V_K^{(0)}$  nécessaires pour calculer  $\Delta P_K^{(1)}$  et  $\Delta Q_K^{(1)}$  ... [19].

### II.3.2. Utilisation de PSAT

Les étapes d'utilisation de PSAT se résument comme suit :

- Ouvrir un nouveau fichier
- Créer du réseau électrique à étudier
- Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation
- Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transfos, ...)
- Exécuter l'écoulement de puissances
- Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

### II.3.2. Analyse de la stabilité transitoire

#### II.3.2.1. Critère de stabilité

La stabilité transitoire du système est appréciée par l'évaluation des angles rotoriques relatifs au générateur de référence, durant et après le défaut et vérifie si le système évolue vers la région de la stabilité ou l'instabilité.

$$\delta_{i1} = \delta_i - \delta_1 \quad i=1, m$$

Si les angles rotoriques relatifs varient suivant une allure oscillatoire amortie autour d'un point d'équilibre, le système est considéré stable. Dans le cas contraire, le système est instable. Le temps limite à partir duquel le système devient instable est appelé : temps d'élimination de défaut (en anglais, Critical Clearing Time, CCT). Pour analyser la stabilité transitoire, nous avons considéré un défaut de court-circuit triphasé symétrique à proximité d'un jeu de barres du SEE (Systèmes Electro Energétiques) étudié. Le défaut est éliminé par l'ouverture du disjoncteur le plus près et la mise hors service de la ligne endommagée [19].

#### II.3.2.2. Calcul du temps critique d'élimination du défaut

Dans le présent travail, La valeur optimale du CCT, est déterminée par essais et erreurs. Pour cela plusieurs valeurs de la durée défaut  $T_d$  sont préalablement choisies et testées consécutivement jusqu'à ce que le système devienne instable. La valeur de ce temps correspond au CCT. Pour éclairer cette approche, on considère un défaut triphasé se produisant, à l'instant  $t = 0,1$  Le défaut persiste durant un intervalle de temps  $T_d$  dont on fait varier la valeur avec des pas très petits afin d'obtenir la valeur critique au-delà de laquelle la

stabilité n'est plus assurée, après  $T_d$  le défaut est éliminé, l'évaluation de la stabilité des trois périodes avant, durant et après défaut.

#### II.4. Réseau test IEEE 30

Le réseau test, montré dans la figure (II.3) comporte six alternateurs connectés aux jeux de barres 1, 2, 5, 8, 11 et 13 à travers des transformateurs de puissance contribuant à l'alimentation de 21 charges.

Nous devons entrer les paramètres des lignes et les caractéristiques de la charge et dès les paramètres des générateurs, les tensions de JB à partir des références [20], [21] et [22].

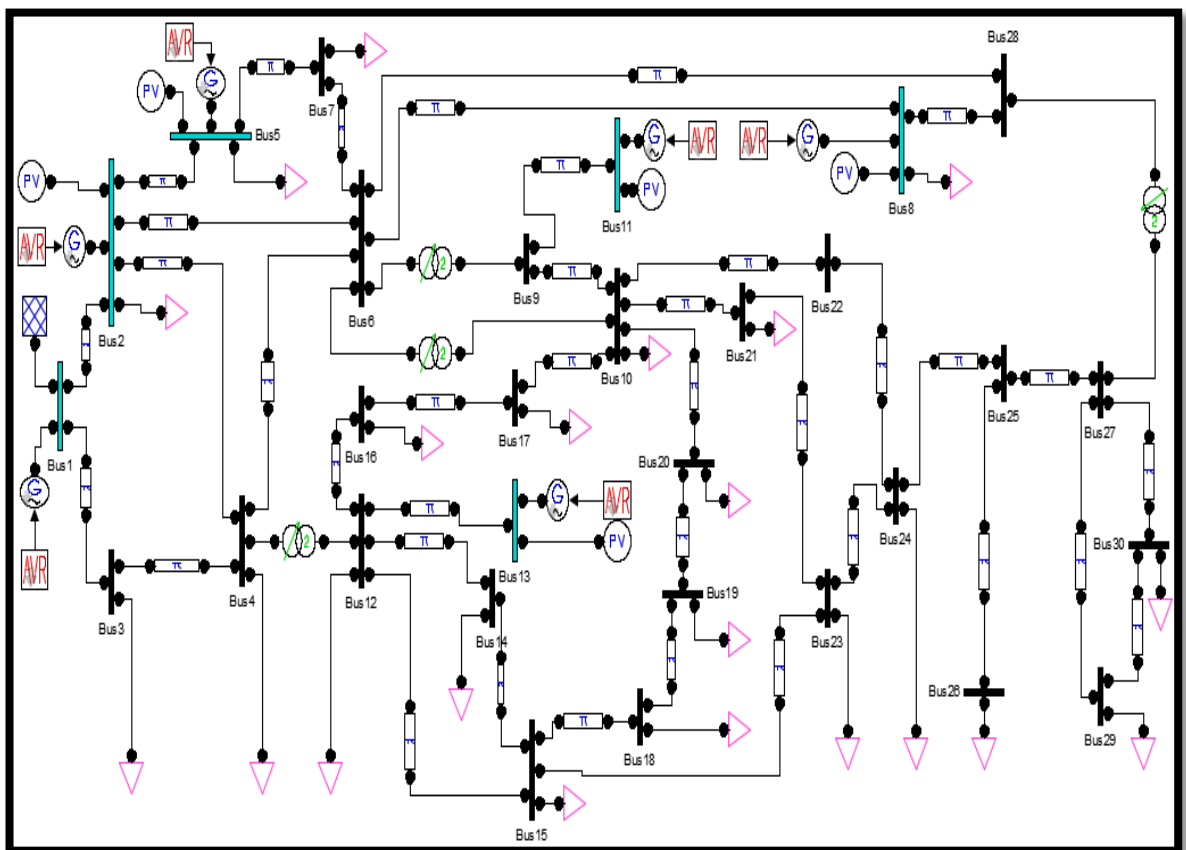


Figure (II.3) Réseau test IEEE 30

Ce réseau contient:

- 6 machines.
- 30 jeux de barres.
- 21 charges

Le tableau (II.1) montre l'emplacement des générateurs de système sur les jeux de barres de réseau test.

**Tableau (II.1)** emplacement des générateurs dans le réseau IEEE 30

Les générateurs	N° du jeu de barre
01	01
02	08
03	13
04	02
05	11
06	05

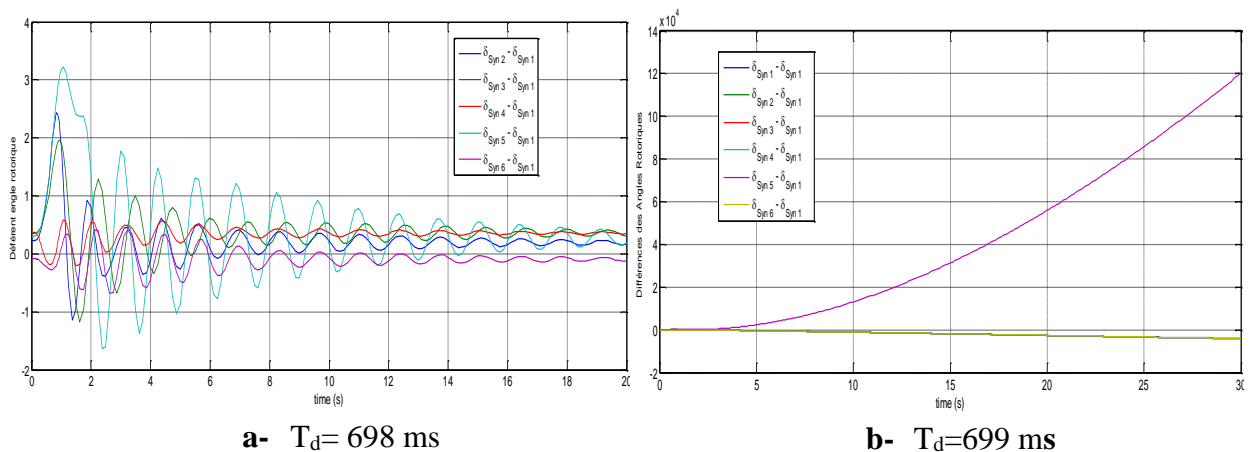
**I.5. Influence de l'intégration de source éolienne**

Dans cette partie on ajoute des éoliennes sur le réseau en présence de défaut sur le jeu de barre 6, et on cherche à trouver le temps critique de l'isolement du défaut dans les cas où les éoliennes sont raccordés ou déconnecté (absence de source éolienne) en observant le comportement transitoire du modèle dans les deux cas.

**II.5.1. Réseau sans source éolienne**

En laisse le réseau sans injection des puissances fournie par les fermes éoliennes, ainsi les données du modèle sont représenté dans l'annexe, et l'insertion de défaut triphasé à la terre via une impédance de 0.01 pu, pour exécuter différentes emplacement de ce dernier. Après plusieurs simulations pour obtenir le temps critique de telles façons que le système arrive à son état maximal de stabilité c'est-à-dire le CCT.

Les résultats de simulation obtenues le CCT pour un défaut au jeu de barre 06, apparu à l'instant 0.1 sec, ce défaut va déconnecter la ligne relie le jeu de barre 06 et le jeu de barre 04.



**a-**  $T_d=698$  ms

**b-**  $T_d=699$  ms

**Figure (II.4)** Angle relatives des générateurs



La figure (II.4) montre l'évolution des angles rotoriques des générateurs synchrones en présence d'un défaut au JB 06 (6-4).

On voit que les angles rotoriques sont convergée ver un état de stabilité pour toutes les générateurs, les sources proche de défaut montre une fluctuation très importante par rapport aux autres sources loin de défaut comme signaler dans la figure (II.4.a) pour un CCT=698 ms. Par contre la figure (II.4.b), qui montres les mêmes angles mais pour une durée de défaut de 699 ms, le générateur 5 de système est entièrement instable.

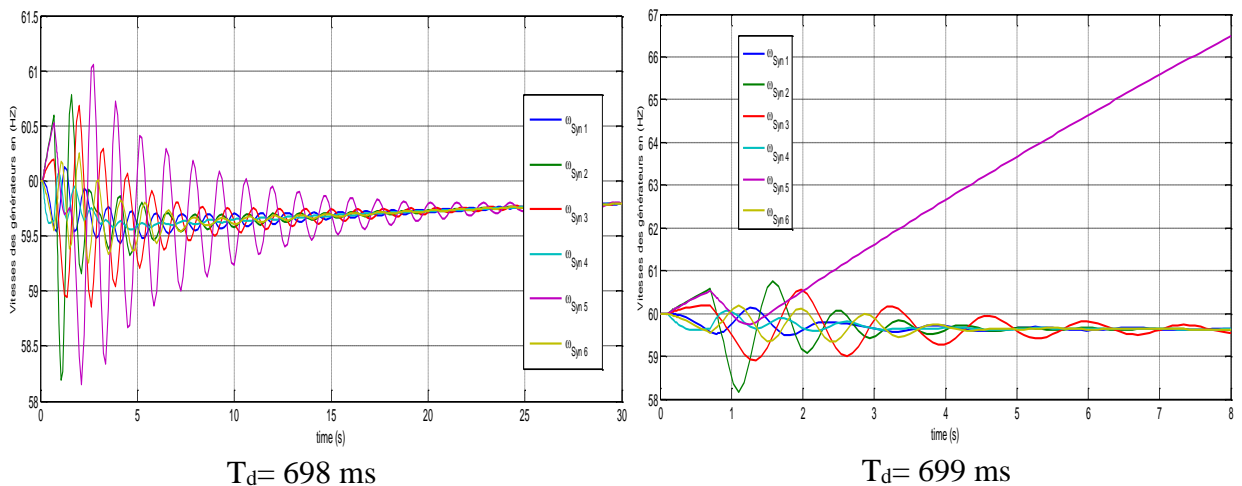


Figure (II.5) fréquences des générateurs

D'après la figure (II.5) on voit que le générateur 5 relie au jeu de barre 11 perd sa stabilité lors de l'apparition de défaut via une déconnection de la ligne 6-4 pour une durée de défaut de 699 ms, et a des fluctuations très importante pour  $T_d=698$  ms par rapport aux autres générateur de système puisque le point de défaut est proche de cette source.

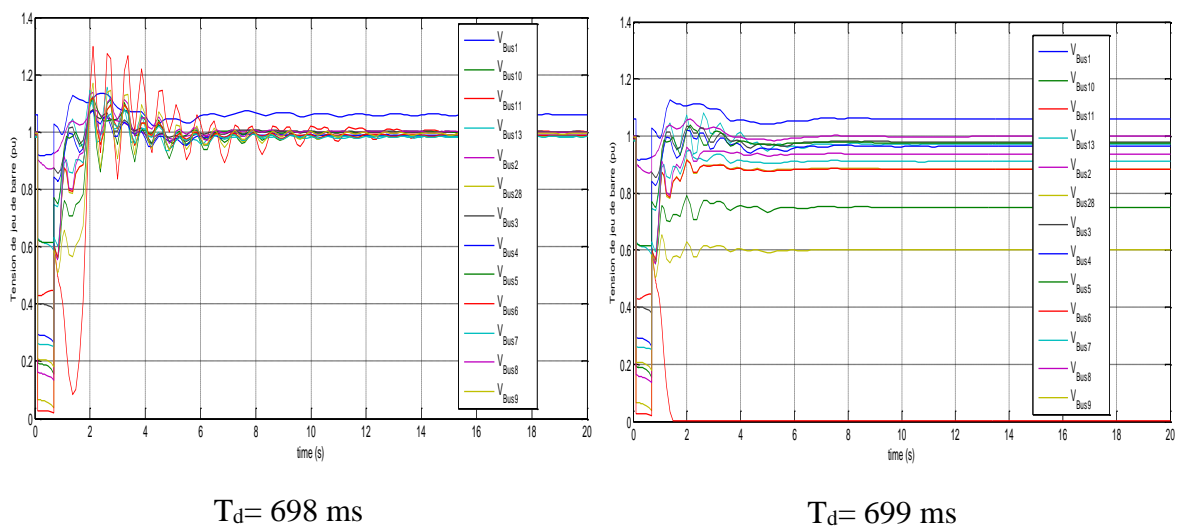


Figure (II.6) tensions de source et défaut

La figure (II.6) montre les tensions des sources ainsi les tensions de défaut et jeux de barre adjacents. Donc pour un temps de défaut de 699ms nous avons remarqué que la tension au jeu de barre auquel la source 5 est raccordé est nulle après le défaut avec des chute des tensions très importante pour les JB's de adjacents de défaut ainsi le jeu de barre en défaut. Par contre pour un  $T_d=698$  ms nous avons remarqué que les tensions sont fluctuées lors de l'apparition de défaut surtout la source 5 ainsi les tensions des jeux de barres en défaut et adjacents.

**II.5.2. réseau avec éolienne**

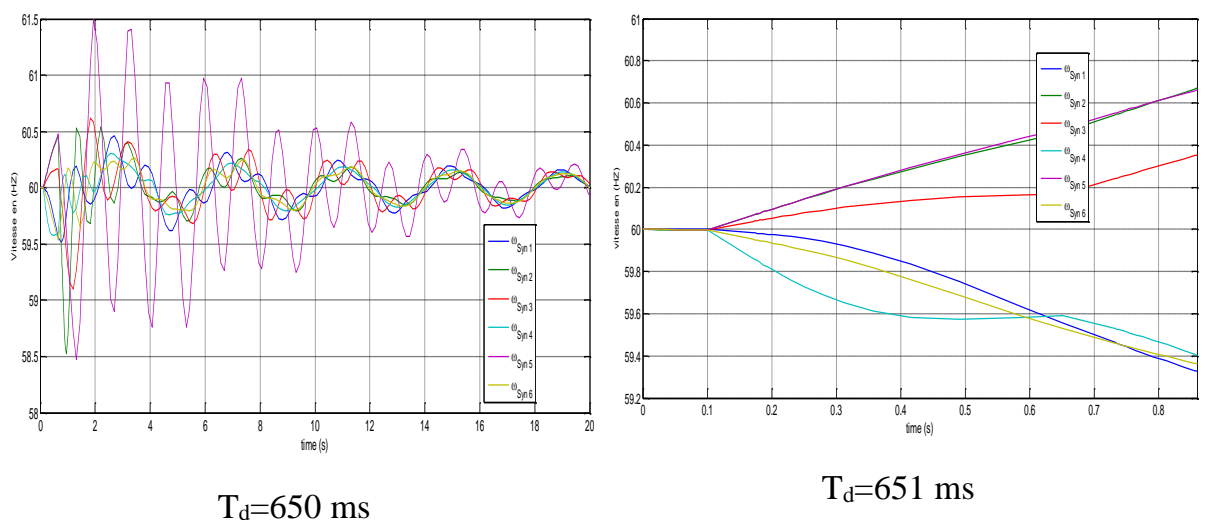
Maintenant, on installe une ferme éolienne de types asynchrone à vitesse variable et fixe sur le réseau IEEE30 jeux de barres de puissance éolienne de 40 MW sur le jeu de barre 28.

**a- Eolienne à vitesse variable**

Une ferme éolienne de type asynchrone à vitesse variables (MADA) de puissance de 40 MW raccordé au jeu de barre JB's 28, le défaut au JB's 6. Les résultats de simulation montrent :

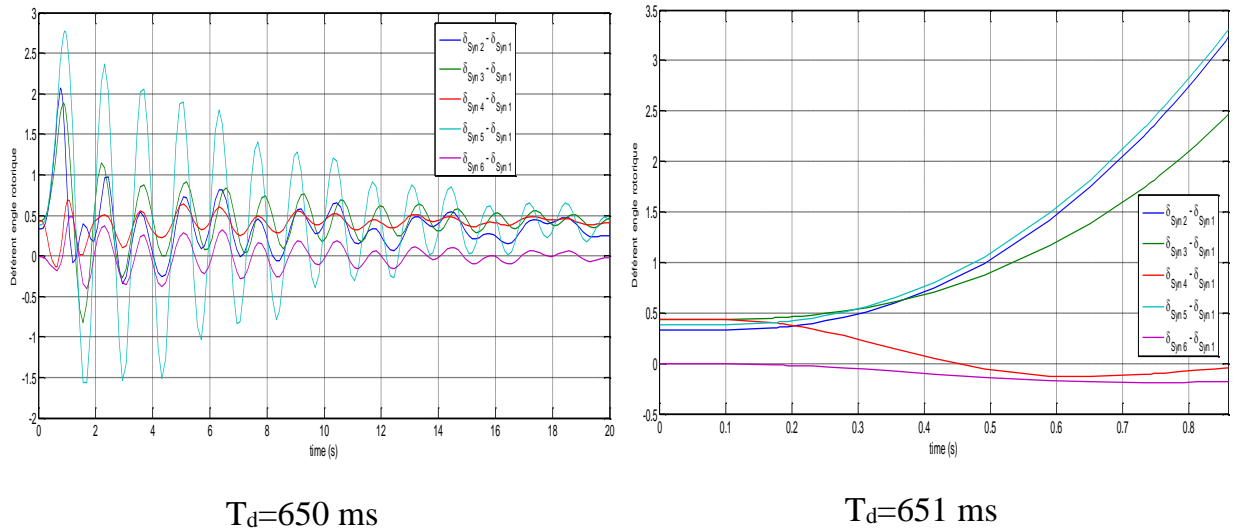
Les deux figures (II.7) qui représente la variation de la fréquence rotoriques des machines synchrones en présence de défaut ainsi une ferme éolienne.

Pour un CCT=650 ms nous avons remarqué que le système est stable avec quelque fluctuation lors et après le défaut même la génératrice proche de défaut qui est perturbée par rapport aux autres générateurs, l'intégration des éolienne type vitesse variable le CCT est diminuer en comparant dans le cas où les éolienne ne sont pas raccordées (CCT=698ms).



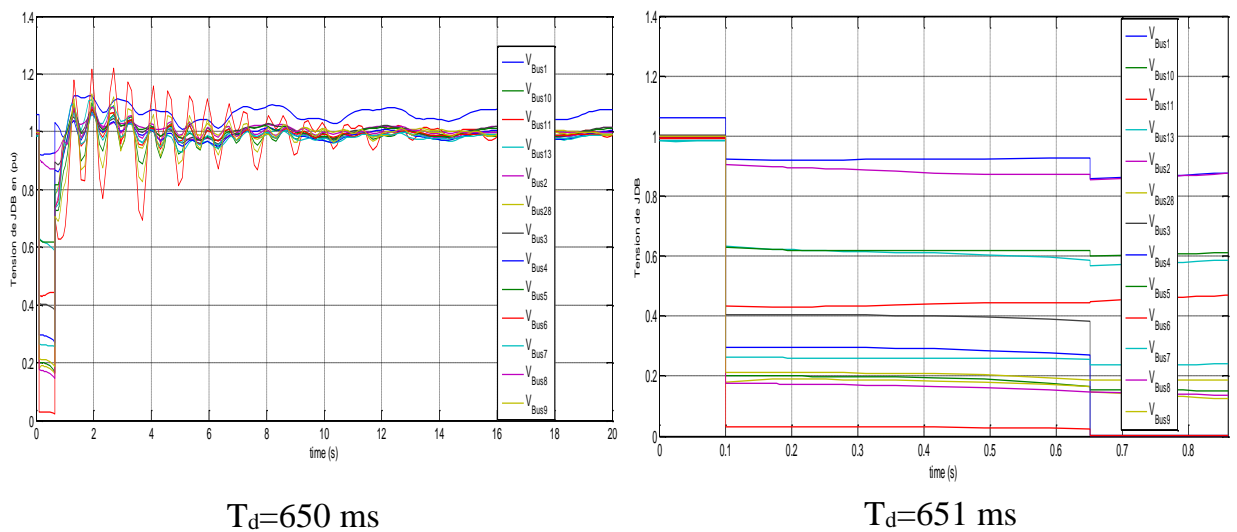
**Figure (II.7) fréquence des générateurs synchrones**

La figure (II.8) montre l'évolution des angles relatifs rotoriques des machines synchrones en présence des sources éoliennes à vitesse variables, donc le système est devient instable lors de  $T_d$  dépasse 650ms.



**Figure (II.8)** angles relatives des machines synchrones

La figure (II.9) montre les tensions des sources ainsi de défaut et jeux de barres adjacents. La partie où le  $T_d= 650$  ms ses tensions sont très basse au cours de défaut surtout le jeu de barre en défaut et fluctuée après l'élimination de défaut par l'ouverture de la ligne 6-4. Les tensions des jeux de barres pour les cas d'un  $T_d$  dépasse 650 ms ses tensions sont très basse lors le défaut et ne revient pas à son état de stabilité.



**Figure (II.9)** tension de sources et jeux de barres

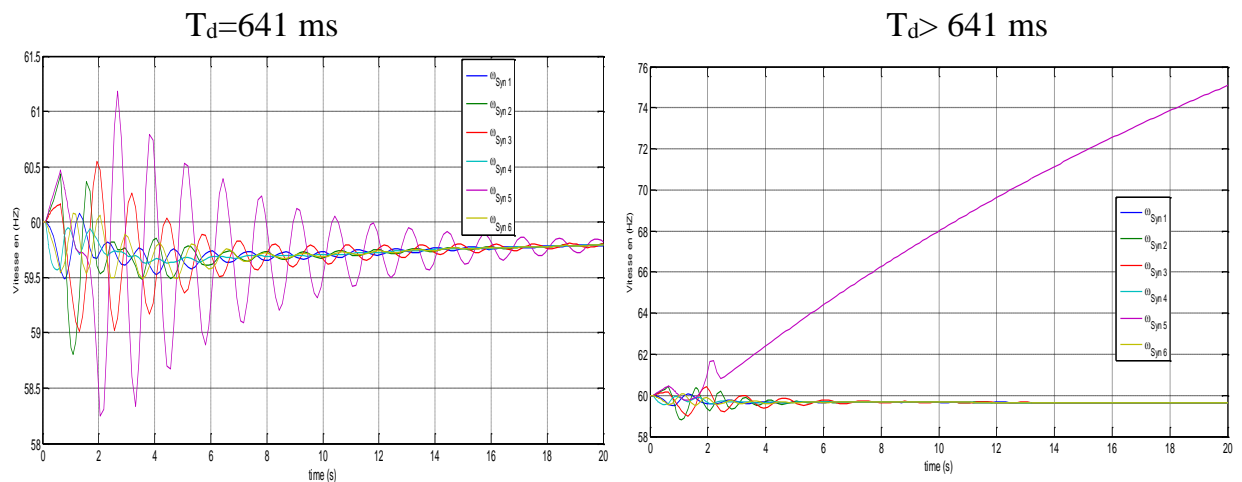
**b- Eolienne à vitesse fixe**

En remplace la machine à vitesse variables (MADA) par une machines asynchrone à vitesse fixe de type machines asynchrone à cage d'écureuil pour cette types d'éolienne à même puissance de 40MW fournie au réseau de 30JBs.

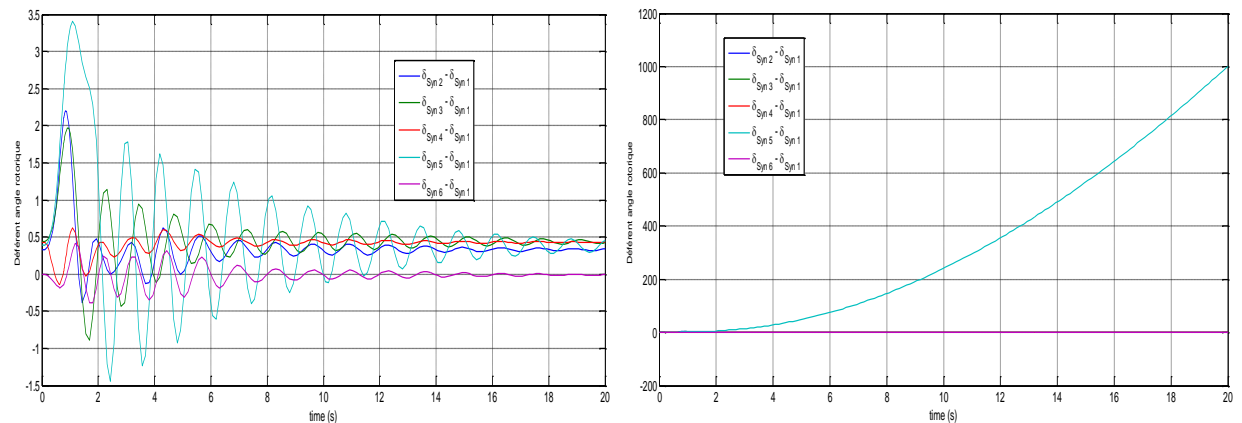
Appliquant le même défaut sur le même jeu de barre, les résultats de simulation montrent :

Que le système soit stable pour un  $T_d= 640$  ms et instable pour le  $T_d > 641$  ms, les fréquences des générateurs synchrones sont fluctuer dans les où le  $T_d$  atteint 640 ms comme la génératrice 5 raccorder au JB11 et s'accélère dès que le  $T_d$  dépasse 641 ms au cours et après le défaut comme montré la figure II.10.

Les angles relatifs aussi sont fluctuer durant et après l'élimination de défaut par l'ouverture de la ligne en défaut (6-4) et se diverges lors le  $T_d > 641$  ms pour la source 05, comme montré dans la figure (II.11).



**Figure (II.10)** Fréquences des générateurs (Hz)



**Figure (II.11)** Angle rotorique relatives (rad)

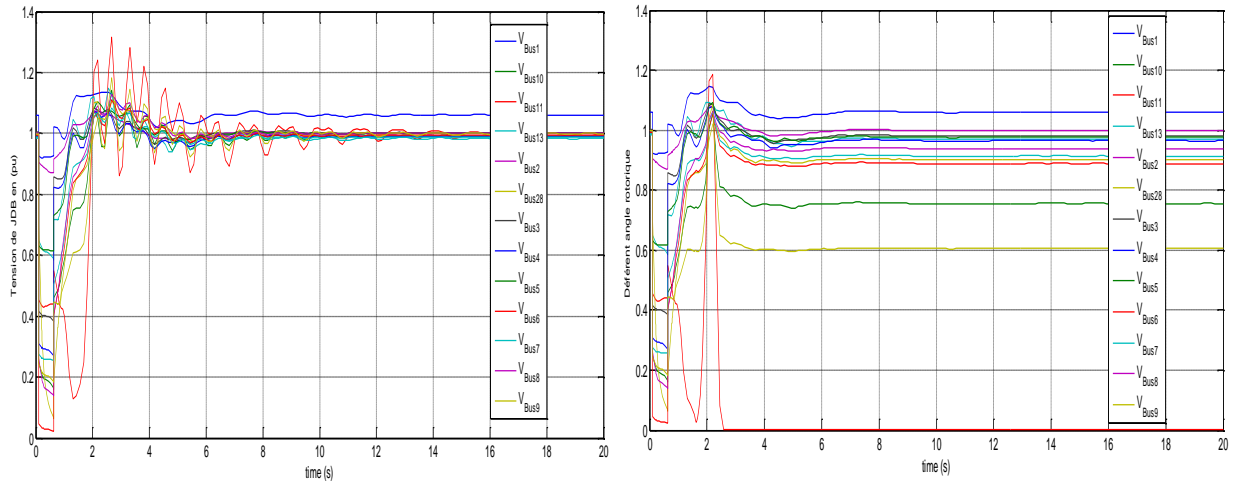


Figure (II.12) Tensions de sources ainsi de JB's défaut et adjacents

Les tensions en défaut et jeux de barres adjacents sont aussi baisse à une des valeurs très inférieure, néanmoins, le jeu de barre en défaut. Pour un  $T_d = 640ms$  ses tensions revienne à son état de fonctionnement avec quelques fluctuations, cependant, la tension de jeu de barre en défaut ainsi le jeu de barre de la source 05, par contre pour un  $T_d > 641ms$ , les tensions des jeux de barres des générations sont très baisse après l'élimination de défaut comme montré dans la figure (II.12).

En comparant avec le cas où l'éolienne de type à vitesse variable le CCT=650ms, mais l'éolienne à vitesse fixe le CCT=641ms, donc l'éolienne à vitesse variable à un apport important dans la stabilité de système de puissance.

Le tableau (II.2) montre le CCT en absence et présence des fermes éolienne de deux types

Tableau (II.2) CCT pour l'insertion des éoliennes

Cas	Sans éolienne	Avec éolienne (vitesse fixe)	Avec éolienne (vitesse variable)
CCT (ms)	698	641	650

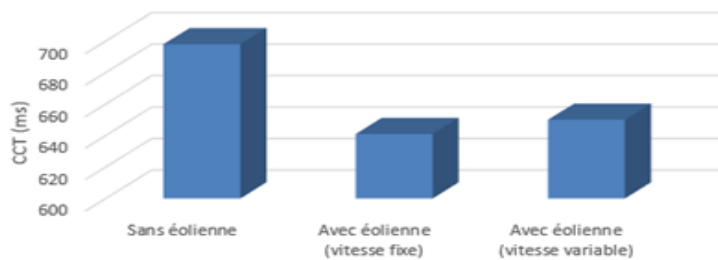


Figure (II.13) CCT pour l'insertion des éoliennes

Il est clair que le système est mieux stable en absence des sources renouvelables telles que les éoliennes dans l'étude de la stabilité transitoire, mais l'intégration des éoliennes types à vitesse variable (MADA) améliore le temps critique de défaut mieux que les éoliennes à vitesse fixe type machine asynchrones à vitesse fixe

**II.6.L'effet d'emplacement des éolienne et leur taux de pénétration sur la stabilité de système**

Pour étudier l'effet de l'emplacement des éolienne sur le réseau, ainsi le taux de pénétration de ces derniers, nous avons choisi deux scénarios comme suit :

**Scénarios 01 :** emplacement des fermes éolienne sur le réseau en considérant le défaut est injecté au jeu de barre où l'éolienne est raccordée c'est-à-dire les jeux de barres (28 et 14), ensuite nous relierons le défaut au jeu de barre 6 et on gardons le lieu de l'implantation de la ferme éolienne au jeu de barre 28. On suppose que l'éolienne est intégrée dans le jeu de barre, car la probabilité de l'incidence de défaut sur la ferme éolienne est considérable par rapport à l'autre emplacement sur le réseau.

On considère la puissance fournie par les éoliennes soit de 80MW (Emplacement de défaut). Le tableau (II.3) montre le CCT de système en présence de défaut

**Tableau (II.3)** CCT pour différent générateur emplacement de défaut

Jeu de barres de défaut	Ligne en défaut	CCT de MAS à vitesse fixe (ms)	CCT de MAS a vitesse variable (ms)
<b>6</b>	<b>6→28</b>	<b>603</b>	<b>608</b>
	<b>6→7</b>	<b>603</b>	<b>607</b>
	<b>6→4</b>	<b>605</b>	<b>608</b>
<b>28</b>	<b>28→8</b>	<b>834</b>	<b>840</b>
	<b>28→6</b>	<b>415</b>	<b>836</b>
<b>14</b>	<b>14→12</b>	<b>131</b>	<b>610</b>
	<b>14→15</b>	<b>150</b>	<b>894</b>

D’après le tableau (II.3), on remarque le CCT au jeu de barre 14 est sensibles par rapport aux jeux de barres 6 et 28 dans le cas où l’éolienne de type vitesse fixe, ainsi le CCT est meilleure lors de l’intégration des éolienne de types vitesse variable.

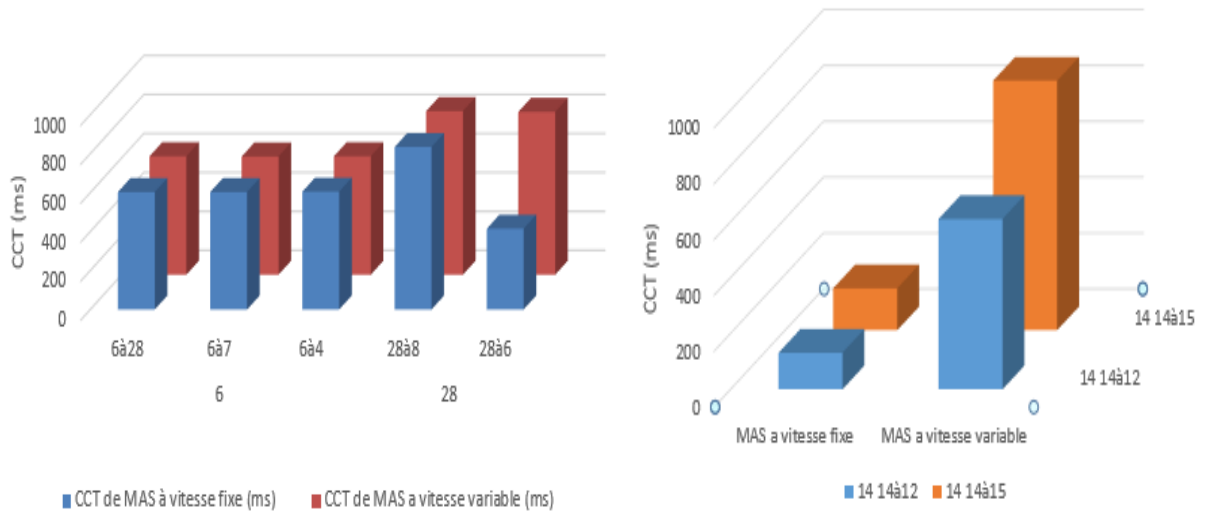


Figure (II.14) CCT en présence des types éoliens

**Scénarios 02 :** la puissance débitée par les fermes éolienne et leurs impacts sur la stabilité de système puissance en gardant les mêmes procédures du scénario 01.

Le tableau (II.4) montre l’importance de la puissance éolienne injectée au réseau dans les deux cas c’est-à-dire éolienne à vitesse fixe ainsi à vitesse variable, en présence de différents emplacement de défaut et la ligne en défaut. Sachant que

- V.F : désigne éolienne à vitesse fixe
- V.V : éolienne à vitesse variable

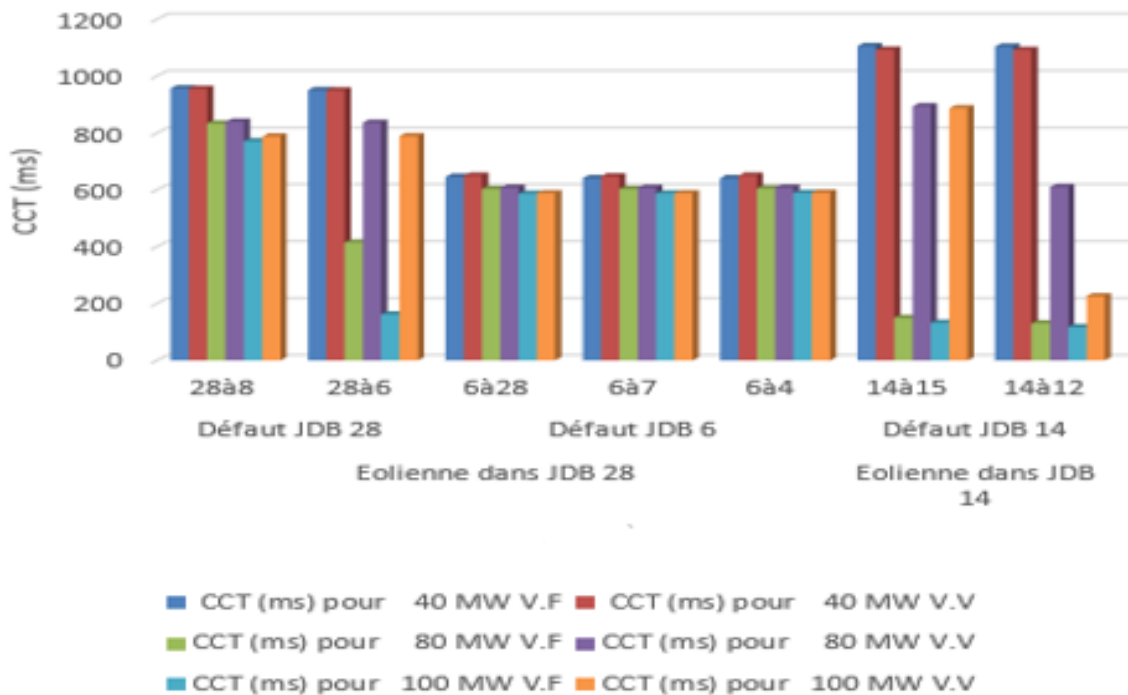
Le tableau montre si on installe une ferme éolienne au JB28 et 14 de différentes types ainsi pour plusieurs point de l’insertion de défaut, tel que le jeu de barre 28, 6, 14 avec suit une déconnexion des lignes lie à ces jeux de barres.

On observe que le CCT diminue lors de taux de pénétration augmente ainsi le CCT est meilleure pour l’éolienne à vitesse variable en comparant avec l’éolienne à vitesse fixe.

La mauvaise déconnexion de la ligne en défaut pour une puissance produite de 100 MW est la ligne 14-12.

**Tableau (II.4)** CCT de générateur pour différent puissance éoliennes

Emplacement d'éolienne	JBs en défaut	Ligne en défaut	CCT (ms) pour 40 MW		CCT (ms) pour 80 MW		CCT (ms) pour 100 MW	
			V.F	V.V	V.F	V.V	V.F	V.V
28	28	28→8	957	956	834	840	771	788
		28→6	951	950	415	836	162	789
	6	6→28	646	650	603	608	586	588
		6→7	641	648	603	607	587	588
		6→4	641	650	605	608	589	590
14	14	14→15	1106	1093	150	894	138	887
		14→12	1104	1092	131	610	117	226

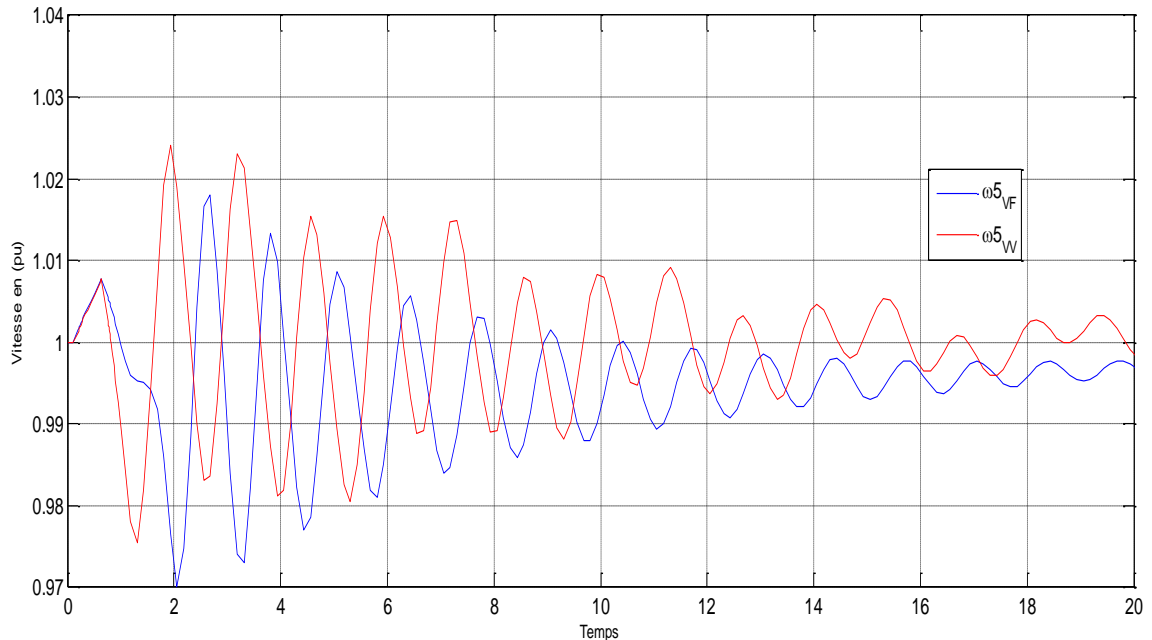


**Figure (II.15)** CCT de générateur pour différent puissance éoliennes

La figure (II.16) montre la vitesse rotorique de la génératrice relie au JB11 qui est sensible au défaut injecté au JB6 en présence de l'éolienne à vitesse fixe ainsi à vitesse variable au JB28.



Le résultat de simulation donne que lors de l'intégration de l'éolienne à vitesse variables en présence de défaut la vitesse ou la fréquence de la génératrice relie au JB11 revient à son états de stabilité proche de 1.0 pu par rapport au cas de l'éolienne à vitesse fixe.



**Figure (II.16)** comparaison des vitesses rotoriques de la génératrice reliée au JB11 pour les deux types d'éolienne

Les résultats des plusieurs simulation montre que l'utilisation des machines asynchrones à doubles alimentation pour les fermes éoliennes intégrée au réseau électriques est meilleure par rapport aux éoliennes utilisent les machines asynchrones à vitesse fixe pour la production éolienne.

Après ces résultats nous notons quelques remarques :

- Le CCT est changé quand l'emplacement de défaut est change
- Le CCT est changé quand on change le lieu de l'éolienne
- Lorsque la puissance augmentée la CCT est diminué
- Le CCT de MADA (vitesse variable) important que du générateur à vitesse fixe pour différent puissance

**II.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté le modèle d'étude ainsi que l'environnement sous lequel les différentes simulations sont développées.

Ensuite, on effectuées plusieurs traités et scénarios pour signaler différent CCT dans chaque cas, cette étude vérifie :

- Influence de type d'éolienne sur la stabilité du réseau électrique
- L'influence de l'emplacement de défaut et les lignes en défaut sur le CCT.
- L'influence de taux de pénétration de la puissance éolienne sur le réseau.

Il est à signaler que toutes ces conclusions sont illustrées après plusieurs simulations (PSAT) appliquées sur le réseau IEEE 30 avec intégration des éoliennes à vitesse fixe ainsi à vitesse variables.

## CONCLUSION GENERALE

Les éoliennes viennent compléter sur un réseau une production majoritairement thermique à flamme, donc émettrice de CO<sub>2</sub>, l'énergie éolienne produite lorsque le vent souffle permet de réduire la production des centrales thermiques, donc se substitue à une énergie émettrice de CO<sub>2</sub>, le recours aux énergies éolienne dans la production électrique représente une solution idéale pour réduire faire face à cette pollution mais son intégration au réseau conventionnel rencontre plusieurs contraintes, notamment en ce qui concerne la qualité de l'électricité et la sécurité du réseau.

Le travail présenté dans ce mémoire a été structuré en 2 chapitres :

Afin d'atteindre ces objectifs, le premier chapitre de notre travail a permis de mettre en évidence la généralité sur le système et les type des générateurs utilisé dans les fermes Eolienne et quelques définitions de stabilité.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés aux la comparaison entre deux modes générateurs asynchrones utilisées dans le système éolienne et étudier l'impact de cette intégration sur la stabilité transitoire du réseau électrique.

D'après les résultats de simulations effectuées à l'aide du logiciel PSAT 2.1.9/MATLAB, on a pu constater ce qui suit:

- L'intégration d'éolienne dégradé la stabilité de réseau
- Le CCT est change si vous modifiez le lieu de défaut
- Le CCT est varié selon l'emplacement d'intégration d'éolienne
- Quand la puissance est augmentée le CCT est diminué
- Les générateurs à vitesse variable plus stable dans le réseau que les générateurs à vitesse fixe.

En fin nous représentons notre étude et le résultat pour améliorer le choix de générateur dans la ferme éolienne moderne (grande puissance), afin de ne pas utiliser moyens traditionnels, d'utilisation par les étudiants.

## ❖ Les données du réseau IEEE-30 :

Tableau 1. Les données des lignes

Pq	Z <sub>pq</sub> (PU)	ypq/2 (PU)
1-2	0.02+j0.06	0+ j0.03
1-3	0.05+j0.19	0+ j0.02
2-4	0.06+j0.17	0+ j0.02
3-4	0.01+j0.04	0.00
2-5	0.05+j0.2	0+ j0.02
2-6	0.06+j0.18	0+ j0.02
4-6	0.01+j0.04	0.00
5-7	0.05+j0.12	0+ j0.01
6-7	0.03+j0.08	0+ j0.01
6-8	0.01+j0.04	0.00
6-9	0.00+j0.21	0.00
6-10	0.00+j0.56	0.00
9-11	0.00+j0.21	0.00
9-10	0.00+j0.11	0.00
4-12	0.00+j0.26	0.00
12-13	0.00+j0.14	0.00
12-14	0.12+j0.26	0.00
12-15	0.07+j0.13	0.00
12-16	0.09+j0.2	0.00
14-15	0.22+j0.2	0.00
16-17	0.08+j0.19	0.00

## ANNEXE

15-18	0.11+j0.22	0.00
18-19	0.06+j0.13	0.00
19-20	0.03+j0.07	0.00
10-20	0.09+j0.21	0.00
10-17	0.03+j0.08	0.00
10-21	0.03+j0.07	0.00
10-22	0.07+j0.15	0.00
21-22	0.01+j0.02	0.00
15-23	0.10+j0.20	0.00
22-24	0.12+j0.18	0.00
23-24	0.13+j0.27	0.00
24-25	0.19+j0.33	0.00
25-26	0.25+j0.38	0.00
25-27	0.11+j0.21	0.00
28-27	0.00+j0.40	0.00
27-29	0.22+j0.42	0.00
27-30	0.32+j0.60	0.00
29-30	0.24+j0.45	0.00
8-28	0.06+j0.20	0+ j0.02
6-28	0.02+j0.06	0+ j0.01

## ANNEXE

Les tensions planifiées ainsi que les puissances consommées sont classées dans le tableau suivant : **Tableau 2.** Valeurs planifiées

Nœuds	Tensions (PU)	Puissance active consommée	Puissance réactive consommée
		<i>PL</i> (MW)	<i>QL</i> (Mvars)
1	1.06+j0.00	0.00	0.00
2	1.00+j0.00	21.7	12.7
3	1.00+j0.00	4.2	1.2
4	1.06+j0.00	7.6	1.6
5	1.00+j0.00	94.2	19.0
6	1.00+j0.00	0.00	0.00
7	1.00+j0.00	22.8	10.9
8	1.00+j0.00	30.0	30.0
9	1.00+j0.00	0.00	0.00
10	1.00+j0.00	5.8	2.0
11	1.00+j0.00	0.00	0.00
12	1.00+j0.00	11.2	7.5
13	1.00+j0.00	0.00	0.00
14	1.00+j0.00	6.2	1.6
15	1.00+j0.00	8.2	2.5
16	1.00+j0.00	3.5	1.8
17	1.00+j0.00	9.0	5.8
18	1.00+j0.00	3.2	0.9
19	1.00+j0.00	9.5	3.4

20	1.00+J0.00	2.2	0.7
21	1.00+J0.00	17.5	11.2
22	1.00+J0.00	0.00	0.00
23	1.00+J0.00	3.2	1.6
24	1.00+J0.00	8.7	6.7
25	1.00+J0.00	0.00	0.00
26	1.00+J0.00	3.5	2.3
27	1.00+J0.00	0.00	0.00
28	1.00+J0.00	0.00	0.00
29	1.00+J0.00	2.4	0.9
30	1.00+J0.00	10.6	1.9

**Tableau 3.** Les puissances des générateurs

N° du Nœuds	P <sub>G</sub> [MW]
1	200
2	80
5	50
8	35
11	30
13	40

**Tableau 4.** Ecoulement de puissance

Bus	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus1	1,06	0,00	0,47	1,22	0,00	0,00
Bus2	1,00	0,00	0,80	-0,94	0,22	0,13
Bus3	1,00	-0,03	0,00	0,00	0,04	0,01
Bus4	0,99	-0,03	0,00	0,00	0,08	0,02
Bus5	1,00	-0,08	0,50	0,44	0,94	0,19
Bus6	0,99	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus7	0,98	-0,06	0,00	0,00	0,23	0,11
Bus8	1,00	-0,04	0,35	0,60	0,30	0,30
Bus9	1,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus10	0,99	-0,06	0,00	0,00	0,06	0,02
Bus11	1,00	0,03	0,30	0,02	0,00	0,00
Bus12	1,01	-0,04	0,00	0,00	0,11	0,08
Bus13	1,00	0,02	0,40	-0,06	0,00	0,00
Bus14	0,99	-0,05	0,00	0,00	0,06	0,02
Bus15	0,99	-0,06	0,00	0,00	0,08	0,03
Bus16	0,99	-0,05	0,00	0,00	0,04	0,02
Bus17	0,99	-0,06	0,00	0,00	0,09	0,06
Bus18	0,98	-0,07	0,00	0,00	0,03	0,01
Bus19	0,97	-0,08	0,00	0,00	0,10	0,03
Bus20	0,98	-0,07	0,00	0,00	0,02	0,01
Bus21	0,98	-0,07	0,00	0,00	0,18	0,11
Bus22	0,99	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus23	0,99	-0,06	0,00	0,00	0,03	0,02
Bus24	0,99	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus25	0,99	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus26	0,97	-0,08	0,00	0,00	0,04	0,02
Bus27	1,00	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus28	0,99	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus29	0,98	-0,10	0,00	0,00	0,02	0,01
Bus30	0,97	-0,11	0,00	0,00	0,11	0,02



Tableau 5. Ecoulement des lignes

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus1	Bus2	1	0,25	0,96	0,02	0,02
Bus1	Bus3	2	0,21	0,26	0,01	0,00
Bus17	Bus10	3	-0,04	-0,04	0,00	0,00
Bus28	Bus8	4	-0,04	-0,06	0,00	-0,02
Bus6	Bus28	5	0,11	0,01	0,00	-0,01
Bus16	Bus17	6	0,05	0,02	0,00	0,00
Bus12	Bus16	7	0,09	0,04	0,00	0,00
Bus13	Bus12	8	0,40	-0,06	0,00	0,02
Bus12	Bus14	9	0,08	0,02	0,00	0,00
Bus14	Bus15	10	0,01	0,00	0,00	0,00
Bus12	Bus15	11	0,18	0,05	0,00	0,00
Bus18	Bus15	12	-0,07	-0,02	0,00	0,00
Bus2	Bus4	13	0,19	-0,02	0,00	-0,01
Bus19	Bus18	14	-0,04	-0,01	0,00	0,00
Bus20	Bus19	15	0,05	0,02	0,00	0,00
Bus10	Bus20	16	0,08	0,03	0,00	0,00
Bus15	Bus23	17	0,03	0,01	0,00	0,00
Bus23	Bus24	18	0,00	-0,01	0,00	0,00
Bus25	Bus24	19	-0,02	0,02	0,00	0,00
Bus10	Bus22	20	0,08	0,05	0,00	0,00
Bus22	Bus24	21	0,02	-0,01	0,00	0,00
Bus21	Bus22	22	-0,06	-0,05	0,00	0,00
Bus10	Bus21	23	0,12	0,06	0,00	0,00
Bus3	Bus4	24	0,17	0,25	0,00	0,00
Bus10	Bus9	25	-0,26	-0,06	0,00	0,01
Bus9	Bus11	26	-0,30	0,00	0,00	0,02
Bus27	Bus25	27	0,02	0,04	0,00	0,00
Bus26	Bus25	28	-0,03	-0,02	0,00	0,00
Bus29	Bus27	29	-0,06	-0,02	0,00	0,00
Bus29	Bus30	30	0,04	0,01	0,00	0,00
Bus27	Bus30	31	0,07	0,02	0,00	0,00
Bus2	Bus6	32	0,23	-0,03	0,00	-0,01
Bus6	Bus4	33	-0,23	0,05	0,00	0,00
Bus5	Bus2	34	-0,38	0,10	0,01	0,01
Bus7	Bus5	35	0,06	-0,15	0,00	-0,01
Bus7	Bus6	36	-0,28	0,04	0,00	0,00
Bus6	Bus8	37	-0,01	-0,25	0,00	0,00
Bus6	Bus9	38	-0,04	0,07	0,00	0,00
Bus6	Bus10	39	0,11	0,15	0,00	0,01
Bus4	Bus12	40	0,06	0,28	0,00	0,01
Bus28	Bus27	41	0,15	0,08	0,00	0,01

**Puissance total généré**

Puissance active [p.u.] 2.81

Puissance réactive [p.u.] 1.27

**Consommation de la charge**

Puissance active [p.u.] 2.763

Puissance réactive [p.u.] 1.195

**Les pertes**

Puissance active [p.u.] 0.05

Puissance réactive [p.u.] 0.07

**Tableau 6** Données dynamiques des générateurs

Générateur	$X_{ls}$ [pu]	$R_s$ [pu]	$X_d$ [pu]	$X'_d$ [pu]	$X''_d$ [pu]	$T'_{d0}$ (s)	$T''_{d0}$ (s)	$X_q$ [pu]	$X'_q$ [pu]
1	0.035	0	0.295	0.17	0.0	6.56	0.05	0.282	0.17
2	0.028	0	0.290	0.0911	0.0	6.7	0.05	0.280	0.0911
3	0.0304	0	0.2495	0.0876	0.0	5.7	0.05	0.237	0.0876
4	0.003	0	0.02	0.008	0.0	7	0.05	0.19	0.008
5	0.0295	0	0.262	0.166	0.0	5.69	0.05	0.258	0.166
6	0.054	0	0.67	0.166	0.0	5.4	0.05	0.62	0.166

**Tableau 6** Données dynamiques des générateurs (suite)

$X''_q$ [pu]	$T'_{q0}$ (s)	$T''_{q0}$ (s)	H (s)	D (s)
0.0	1.5	0.045	30.3	2
0.0	0.41	0.045	24.3	2
0.0	0.5	0.045	35.8	2
0.0	0.7	0.045	500/10	2
0.0	1.5	0.045	28.6	2
0.0	0.44	0.045	26	2

- [01] **M. MOKHNACHE** « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS » Thème de Magister de université Ferhat Abbas — Sétif 2012.
- [02] **M. LATRECHE** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » Thème de Magister de Université Ferhat Abbas de Sétif 2012.
- [03] **B.TOUAL** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Thème de Magister de université de Batna 2010.
- [04] **M. JOURIEH** « D'EVELOPPEMENT D'UN MODELE REPRESENTATIF D'UNE 'EOLIENNE AFIN D'ETUDIER L'IMPLANTATION DE PLUSIEURS MACHINES SUR UN PARC 'EOLIEN » Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [05] **F. POITIERS** « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2003.
- [06] **N.CHERFIA** « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » Thème de magister de Université Mentouri – Constantine 2010.
- [07] **BAROMÈTRE ÉOLIEN – EUROBSERV'ER – FÉVRIER 2016.**
- [08] **S. HAMECHA, Ep. BOUREKACHE** « Etude et Commande d'un Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Thème de Magister de Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013.
- [09] **M. HASSAD** « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques » Thème de magister d'UNIVERSITE SETIF 1 2012.
- [10] **S. EL AIMANI** « ETUDE DE LA STABILITE D'UNE FERME EOLIENNE CONNECTEE A UN RESEAU ELECTRIQUE AVEC DES DISPOSITIFS FACTS » thèse de doctorat de l'université de sciences et technologies de LILLE 2004.
- [11] **M. Deicke, R.W. De Doncker**, « Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines » IEEE Industry Applications Magazine, May-June 2000, 1077—261S/02, pp. 26.33.
- [12] **B.BOUHADOUZA** « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes

par l'utilisation du STATCOM » Thème de Magister de Université FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE) 2011.

[13] **M. MAHBOUB** « Modélisation et commande d'un system éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais » Thème de Magister de Université FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE) 2012.

[14] **H. ALKHATIB**, « ETUDE DE LA STABILITE AUX PETITES PERTURBATIONS DANS LES GRANDS RESEAUX ELECTRIQUES : OPTIMISATION DE LA REGULATION PAR UNE METHODE METAHEURISTIQUE » Thèse de Doctorat, Université de Marseille 2008.

[15] **P. KUNDUR** « *Power System Stability and Control* » Ed. McGraw Hill Inc, New York.

[16] **M. AMROUNE** « Etude de l'apport des systèmes de transmission flexible en courant alternatif (FACTS) sur la stabilité d'un réseau électrique en présence des générateurs disperses » Thème de Magister de Université de Sétif (1) 2012.

[17] **D. Naimi –T. Bouktir -A. Salhi** « Improvement of Transient Stability of Algerian Power System Network with Wind Farm » Laboratory of Electrical Engineering (LGEB), Biskra University, Algeria- Department of Electrical Engineering, Faculty of technology, University of Setif1, Algeria 2013.

[18] **A. DAVIGNY** « Participation aux services systèmes de fermes éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 2007.

[19] **F. ZITOUNI** « Amélioration De La Stabilité Transitoire Des Réseaux Electriques Par L'utilisation Des Systèmes FACTS » Thème de Magister de Université de Ferhat Abbas — Sétif 2010.

[20] **B. NAAMA** « CONTRIBUTION A L'EVALUATION ET AU PERFECTIONNEMENT DES METHODES META HEURISTIQUES D'OPTIMISATION COMBINATOIRE. APPLICATION A L'OPTIMISATION DES PUISSANCES ACTIVES D'UN RESEAU D'ENERGIE ELECTRIQUE » Thèse de Doctorat de Université de DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES.

[21] **B. BOUSSAHOUA** « *Evaluation de la sécurité transitoire des réseaux électriques par les algorithmes intelligents* » Thèse de Doctorat d'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene 2012.

[22] **The IEEE 30 Bus Test Case** represents a portion of the American Electric Power

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

System (in the Midwestern US) as of December, 1961. The data was kindly provided by Iraj Dabbagchi of AEP and entered in IEEE Common Data Format by Rich Christie at the University of Washington in August 1993.

ان زيادة الطاقة الهوائية المدمجة في الشبكة الكهربائية عبر العالم لها تأثير متزايد على هذه الشبكة نظرا لعدم القدرة على توقع الإنتاج مما يحد من قدرة الشبكة، وكذلك خطر الانقطاع المفاجئ للحضائر الهوائية والحد من جودة الكهرباء. وفي هذه المذكرة نطرح دراسة عن تأثير مولدات الطاقة الهوائية على استقرار الشبكة الكهربائية، والمقارنة بين هذه المولدات.

وسنقوم بالبحث عن الوقت اللازم للقضاء على المشكل وهذه النتائج ممثلة في جداول وأعمدة بيانية بالإضافة الى منحنيات بيانية، واستخدمنا في هذه الدراسة برنامج PSAT 2.1.9/MATLAB.

**الكلمات المفتاحية:** مولدات هوائية، تأثير المولدات الهوائية على الشبكة، استقرار الشبكة الكهربائية، المقارنة بين المولدات الهوائية، الوقت اللازم للقضاء على المشكل.

### Résumé

L'augmentation de la puissance éolienne installée en le monde a un impact croissant sur le réseau de transport du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes d'éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité. Dans cette mémoire, nous proposons une étude de l'effet des générateurs éoliens sur la stabilité de réseaux électrique, et comparai entre ces générateur.

Ainsi que nous cherchent le temps d'élimination de défaut. Ces résultats représentés par les graphiques et le tableau, cette étude à l'aide du logiciel PSAT 2.1.9/MATLAB.

**Mot clé:** générateurs éoliennes, impact d'éolienne sur le réseau, stabilité de réseaux électrique, comparaison entre les générateurs éolien, temps d'élimination de défaut.

### Abstract:

The increase in installed wind power worldwide has an increasing impact on the transmission system due to the difficulty in forecasting production, the limited capacity of the network, the risk of untimely disconnections from wind farms And a degradation in the quality of electricity. We propose a study of the effect of wind generators on the stability of electrical networks and compare wind generators.

As well as we seek critical clearing time. These results represented by the graphs and the table, this study using the software PSAT 2.1.9 / MATLAB

**Key word:** wind generators, effect of wind generators on the networks, stability of electrical networks, comparison between wind generators, critical clearing time.