

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR –ANNABA-**



Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'électrotechnique



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : Master

Intitulé :

Etude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau

Domaine : Science et technologie

Option : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par : KADDOUR MEHDI

BOUSTER IMED

ENCADRÉ PAR : Mr.labar Houcin

Président de jury : Mr.Mesbah Tarek

Examineurs :Mme.Benalia Nadia

Promotion : 2018//2019

Table des matières

1	Énergie renouvelable :	4
1.1	Différent sources d'énergies renouvelable :	4
1.1.1	Énergie solaire :	4
1.1.1.1	Centrales solaires thermiques :	5
1.1.1.1.1	Les centrales à collecteurs cylindriques :	6
	De longs miroirs tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons sont concentrés sur un tube dans lequel circule le fluide qui servira à transporter la chaleur vers la centrale.	6
1.1.1.1.2	Les centrales à tour :	6
	Un champ de miroirs orientables situés au sol renvoie les rayons solaires sur une chaudière située en haut d'une tour.	6
1.1.1.1.3	Les centrales à collecteurs paraboliques :	6
	Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de paraboles orientables dans lesquelles se trouve des mini-centrales électrique	6
1.1.1.2	Centrale photovoltaïques :	6
1.1.1.3	Avantages de l'énergie solaire:	7
1.1.1.4	Inconvénients de l'énergie solaire :	7
1.1.2	L'énergie hydraulique :	7
1.1.2.1	Centrale hydroélectrique :	8
1.1.2.2	Les avantages :	9
1.1.2.3	Les inconvénients :	9
1.1.3	L'énergie géothermique :	9
1.1.3.1	Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique :	10
1.1.4	LA BIOMASSE :	10
1.1.4.1	Les avantages :	11
1.1.4.2	Les inconvénients :	12
1.1.5	L'énergie éolienne :	12
1.1.5.1	Les différents types d'éoliennes :	14
1.1.5.1.1	Les éoliennes à axe horizontal :	14
1.1.5.1.2	Les éoliennes à axe vertical :	14
1.1.5.2	Nouvelle technologie des éolien :	15
1.1.5.2.1	Éolienne sans pales :	15

1.1.5.2.2	Hydrolienne :	16
1.1.5.3	L'énergie éolienne dans le monde :	17
1.1.5.4	L'éolien en Algérie	18
1.1.5.4.1	Carte du gisement éolien en Algérie	18
1.1.5.5	Avantage :	19
1.1.5.6	Inconvénients :	19
2	Systèmes éoliens :	22
2.1	Définition de l'énergie éolienne :	22
2.2	Éléments constitutifs d'une éolienne :	23
2.3	Classification	27
2.4	Fonctionnement d'une éolienne :	28
2.5	Etat de l'art sur la conversion électromécanique :	30
2.5.1	Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil :	30
2.6	Systèmes utilisant la machine synchrone :	31
2.7	Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :	32
2.8	Modélisation de la turbine éolienne :	33
2.8.1	Puissance et couple aérodynamique de l'éolienne :	33
2.8.2	Fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanent :	35
3	Simulation d'une ferme Eolienne connecté au réseau.....	38
3.1	La description :	38
3.2	Simulation de la turbine :	38
3.2.1	Fonctionnement du système de protection :	39
3.2.2	Impact de STATCOM :	39
3.2.3	Simulation :	39
3.2.4	Simulation sans statcom :	42
4	Conclusion générale :	44
5	Bibliographie :	45
6	Liste de figures.....	46

Introduction générale :

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer. La demande en énergie électrique est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune). Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,....

Dans notre travail de fin d'étude, on essaiera de présenter une approche sur

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

- **Sources d'énergie renouvelable** : dans ce chapitre nous présentons les différentes sources de l'énergie renouvelable
- **Chapitre 02** : La conversion éolienne
- **Chapitre 03** : Simulation d'une ferme éolienne connectée au réseau

1 Énergie renouvelable :

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issue directement de phénomènes naturels , réguliers ou constants ,liés à l'énergie du soleil , de la terre ou de la gravitation . Les énergies renouvelables sont également plus «propres» (moins d'émission de CO2, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. Les principales énergies renouvelables sont :

- l'énergie solaire,
- énergie éolienne,
- énergie issue de la biomasse,
- énergie géothermique,
- énergie hydraulique.

Leur caractéristique commune est de ne pas produire d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre

1.1 Différent sources d'énergies renouvelable :

1.1.1 Énergie solaire :

L'énergie solaire est produite par le rayonnement du soleil. On distingue l'énergie photovoltaïque qui, comme son nom le laisse entendre, transforme l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en électricité, de l'énergie solaire thermique qui, elle, transforme ce même rayonnement en chaleur.

On distingue :

- Centrales solaires thermiques (chauffe-eau, cuisinières, distillateurs, séchoirs solaires) qui utilisent directement le rayonnement solaire.

- les cellules solaires photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire en électricité par exemple pour pomper l'eau ou pour alimenter de petits réseaux électriques.

1.1.1.1 Centrales solaires thermiques :

Le fonctionnement des centrales solaires thermiques repose sur la technique suivante :

1. Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C).
2. La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière.
3. La vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur.
4. L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

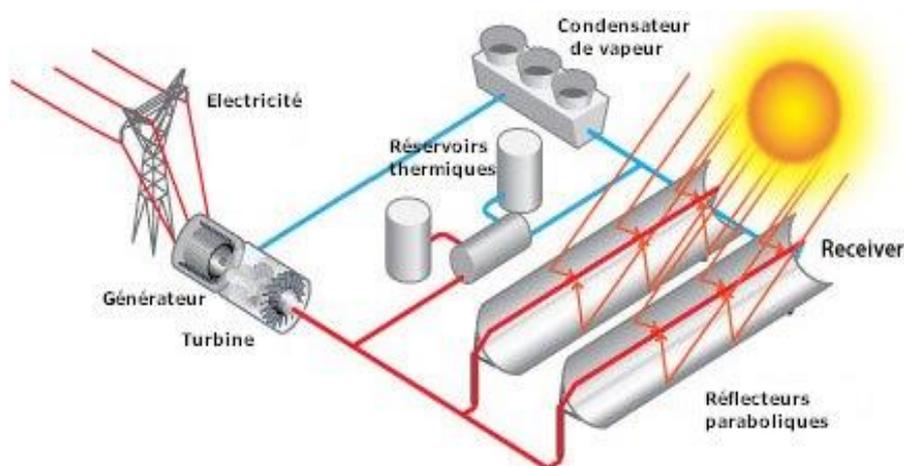


Fig-1- 1 Centrale électrique thermique solaire

Il existe 3 types de centrales solaires, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

1.1.1.1.1 Les centrales à collecteurs cylindriques :

De longs miroirs tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons sont concentrés sur un tube dans lequel circule le fluide qui servira à transporter la chaleur vers la centrale.

1.1.1.1.2 Les centrales à tour :

Un champ de miroirs orientables situés au sol renvoie les rayons solaires sur une chaudière située en haut d'une tour.

1.1.1.1.3 Les centrales à collecteurs paraboliques :

Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de paraboles orientables dans lesquelles se trouve des mini-centrales électrique

1.1.1.2 Centrale photovoltaïques :

L'énergie photovoltaïque désigne l'énergie récupérée par des panneaux solaires pour la transformer en électricité. Les cellules photovoltaïques du panneau solaire produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire. Courant qui peut alors être utilisé pour chauffer, éclairer, recharger la batterie d'un appareil... Le principe photovoltaïque des panneaux lumineux est à grande échelle le même que celui utilisé par les calculatrices de poche. A noter que l'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par un français, Antoine Becquerel.



Fig-1- 2 Centrale photovoltaïque

1.1.1.3 Avantages de l'énergie solaire:

- L'énergie solaire est une bonne source d'énergies renouvelable car elle est non-polluante de plus que la lumière ne coute rien.
- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles

1.1.1.4 Inconvénients de l'énergie solaire :

- Par contre il n'y a pas de lumière la nuit, on a besoin de beaucoup d'espace pour l'installer et le déplacement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux [1].
- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement cher.

Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome

1.1.2 L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologie permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie Mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.



Fig-1- 3 centrale hydraulique

1.1.2.1 Centrale hydroélectrique :

1/5 des besoins en énergie totaux de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages. La construction en Chine est la plus grande centrale électrique au monde. Le Barrage des Trois Gorges qui produira environ 18200 mégawatts

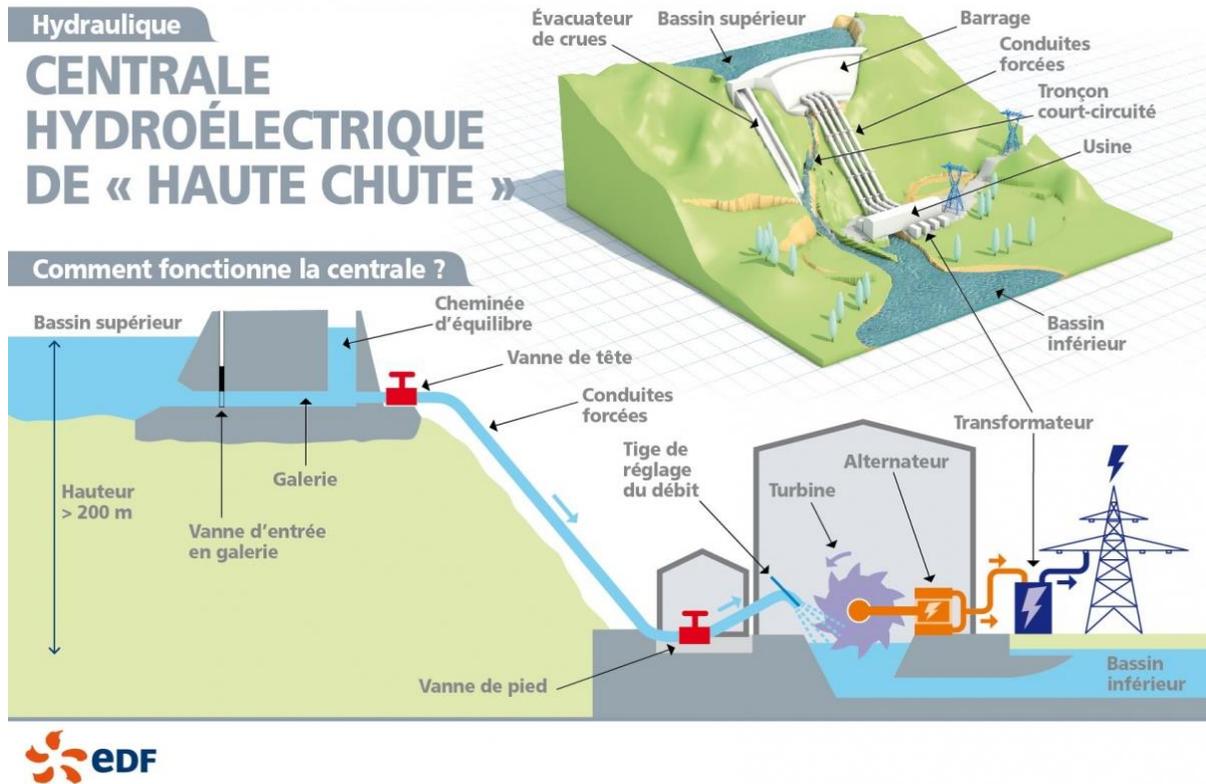


Fig-1- 4 Centrale hydroélectrique

Fondamentalement, une centrale hydroélectrique est constituée de trois éléments :

- un barrage (sauf pour les installations au fil de l'eau).
- un canal de dérivation.
- les dispositifs de conversion en électricité.

1.1.2.2 Les avantages :

- Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante).
- C'est une énergie propre et inépuisable sans émission de fumées et pollution, et qu'est le moins chère car retour d'investissement est très rapide.
- La gestion des cours d'eau permet le contrôle des crues.
- En période de sécheresse, on lâche de l'eau.
- En période d'inondation, on retient le surplus d'eau.

1.1.2.3 Les inconvénients :

- Les plus gros barrages peuvent noyer des surfaces très importantes, pouvant comprendre des zones d'habitation (déplacement de population). Ils peuvent mettre en péril les écosystèmes locaux (faune et flore).
- Les barrages peuvent s'ensaver car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous les éléments charriés par les cours d'eau.
- Le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peuvent provoquer des dégâts considérables en aval du barrage (raz-de-marée).

1.1.3 L'énergie géothermique :

- L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique.
- Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches.

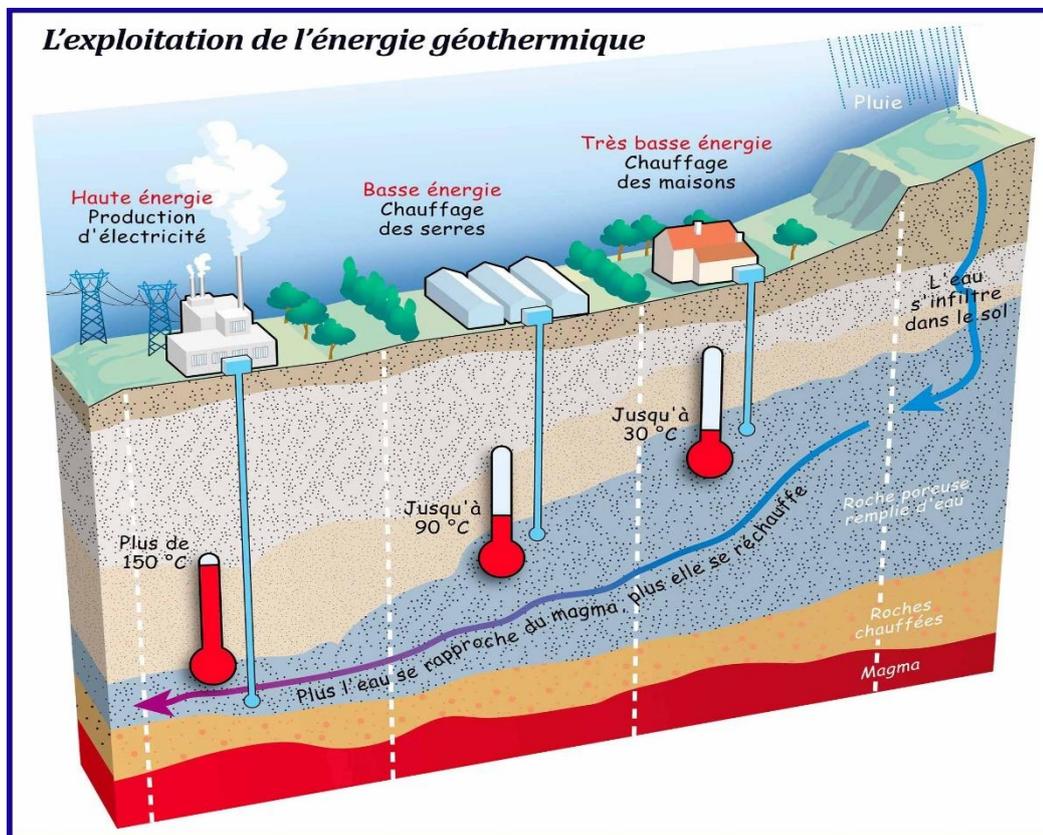


Fig-1- 5 L'énergie géothermique

On caractérise 3 types d'énergie :

- La géothermie à haute énergie.
- La géothermie à basse énergie.
- La géothermie à très basse énergie

1.1.3.1 Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique :

C'est une énergie non polluante et non-toxique, ne produit aucun déchet et elle permet de produire beaucoup d'énergie pour peu de place. Par contre le transport de l'énergie des usines est coûteux.

1.1.4 LA BIOMASSE :

Ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques [4]. On distingue deux types de biomasse :

- **Biomasse sèche** : le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie »

- **Biomasse humide** : les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers...), agroalimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères ...) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement.

Schéma de principe d'une usine biomasse

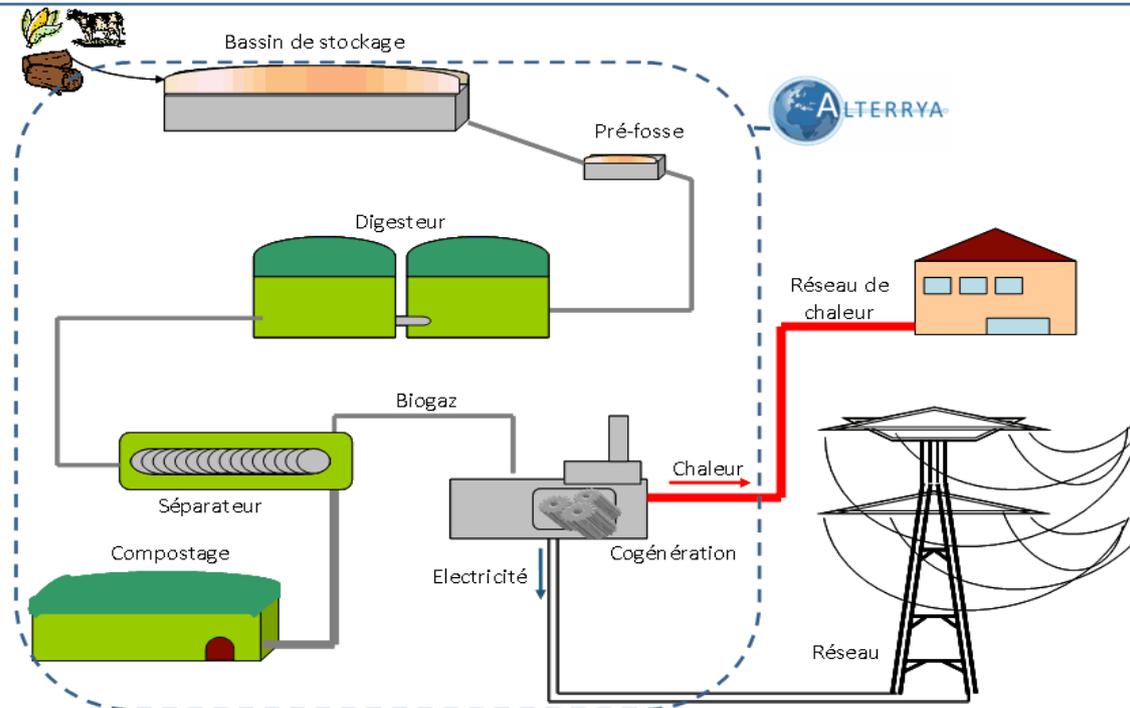


Fig-1- 6 usine biomasse

1.1.4.1 Les avantages :

- C'est une matière première qui est renouvelable. elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- Biodégradable rapidement.
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- La biomasse est disponible partout.
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables.
- Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse).
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

1.1.4.2 Les inconvénients :

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols.
- Les couts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

1.1.5 L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

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



Fig-1- 7 éolien

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.



Fig-1- 8 éolien on shore et offshore

On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :

- industrielles : les grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique ;

- domestiques : des petites éoliennes installées chez les particuliers.

1.1.5.1 Les différents types d'éoliennes :

1.1.5.1.1 Les éoliennes à axe horizontal :

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et sont souvent constituées de trois pales. Ce sont celles les plus courantes. Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.

1.1.5.1.2 Les éoliennes à axe vertical :

L'axe du rotor est perpendiculaire au sol. Elles n'ont besoin d'aucun système pour les orienter dans la direction du vent, cependant leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies dans le vent.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : **Savonius** et **Darrieus**

les éoliennes à axe vertical de type Darrieus possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes "classiques" à pôle.

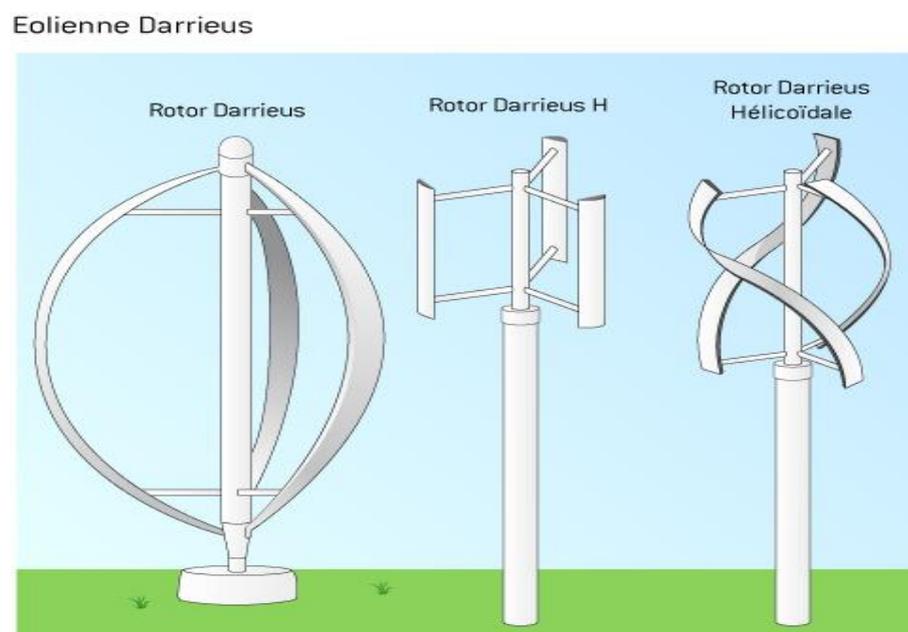


Fig-1- 9 éolien Darrieus

Eolienne à axe vertical de type Savonius Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pôle, l'éolienne Savonius a l'avantage de fonctionner avec

toutes les directions de vent. Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

L'implantation d'éolienne verticale sur un **bâtiment** n'est pas une opération anodine car les vibrations peuvent endommager le bâti.



Fig-1- 10 éolien Savonius

1.1.5.2 Nouvelle technologie des éolien :

1.1.5.2.1 Éolienne sans pales :

L'entreprise espagnole Vortex Bladeless a conçu une éolienne sans pales, qui offrirait des performances égales à celles des éoliennes tripales conventionnelles. Le premier modèle devrait être commercialisé à la fin de l'année. On connaissait les éoliennes tripales, les énormes turbines à vent, ou les éoliennes aéroportées. Mais un nouveau modèle pourrait également surplomber les contrées : le «Vortex». Ce long cône n'arbore aucune pale contrairement à ses ainées bruyantes, mais transforme comme elles l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis électrique. Alors, pour brasser le vent, cette nouvelle machine exploite l'effet aérodynamique des tourbillons de l'air, contrairement aux éoliennes classiques qui utilisent des courants laminaires. Le mat est conçu dans des matériaux fin et léger afin qu'il puisse osciller le plus rapidement possible. Pour accompagner cet effet, deux anneaux magnétiques, installés à la base de l'appareil, se repoussent l'un l'autre, entraînant alternativement l'éolienne Vortex dans deux directions opposées, ce qui lui confère un mouvement supplémentaire en plus du vent.



Fig-1- 11 éolienne sans pales

1.1.5.2.2 Hydrolienne :

Contrairement aux centrales marémotrices qui captent l'énergie potentielle due à la différence de hauteur, les hydroliennes cherchent à capter l'énergie cinétique des courants marins. Certes la production d'énergie est moins élevées mais elles ne font pas barrage et laissent donc passer pêcheurs, plaisanciers et faune marine.

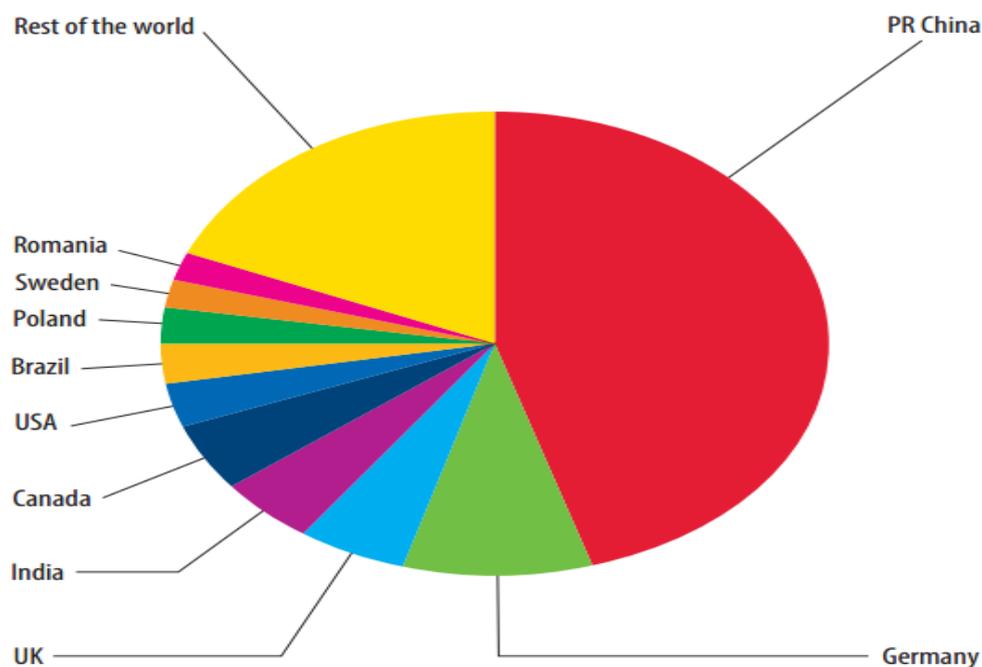


Fig-1- 12 Hydrolienne

1.1.5.3 L'énergie éolienne dans le monde :

Selon le Conseil Mondial pour l'Énergie Eolienne, l'éolien représentait 282 GW de puissance installée (+ 19 % en 2012, soit 45 GW supplémentaires) au niveau mondial (dont 35 % en Europe et 2,5 % en France). L'éolien reste l'énergie renouvelable reste de loin la plus importante après l'énergie hydraulique (750 GW installés) mais loin devant le solaire qui vient seulement de passer la barre des 100 GW. A titre de comparaison, la puissance mondiale installée en nucléaire est de l'ordre de 370 GW.

En terme de production effective d'électricité, l'éolien représente à présent plus de 500 TWh par an dans le monde, soit l'équivalent de la consommation totale d'électricité de la France mais même si cette production a été multipliée par trois en 5 ans, elle représente toujours moins de 3 % de la production électrique mondiale qui est de l'ordre de 21 000 TWh par an.



Country	MW	% SHARE
**PR China	16,100	45.4
Germany	3,238	9.1
UK	1,883	5.3
India	1,729	4.9
Canada	1,599	4.5
USA	1,084	3.1
*Brazil	948	2.7
Poland	894	2.5
Sweden	724	2.0
Romania	695	2.0
Rest of the world	6,573	18.5
Total TOP 10	28,894	81
World Total	35,467	100.0

** Provisional Figure

* Projects fully commissioned, grid connections pending in some cases

1.1.5.4 L'éolien en Algérie

L'Algérie vient d'inaugurer, le 3 juillet 2014, son premier parc éolien, situé à Kabertene dans le centre du pays, au nord de la ville d'Adrar.

Doté de douze éoliennes, fournies par le groupe espagnol Gamesa (CA 2013 : 2,34 mrds €), il dispose d'une capacité de 10 MW.

Réalisés par Cegelec, une filiale du français Vinci (CA 2013 : 40,34 mrds €), pour le compte de la compagnie publique Sonelgaz (CA 2012 : 1,89 mrd €), les travaux auront coûté 25,9 M€.

1.1.5.4.1 Carte du gisement éolien en Algérie

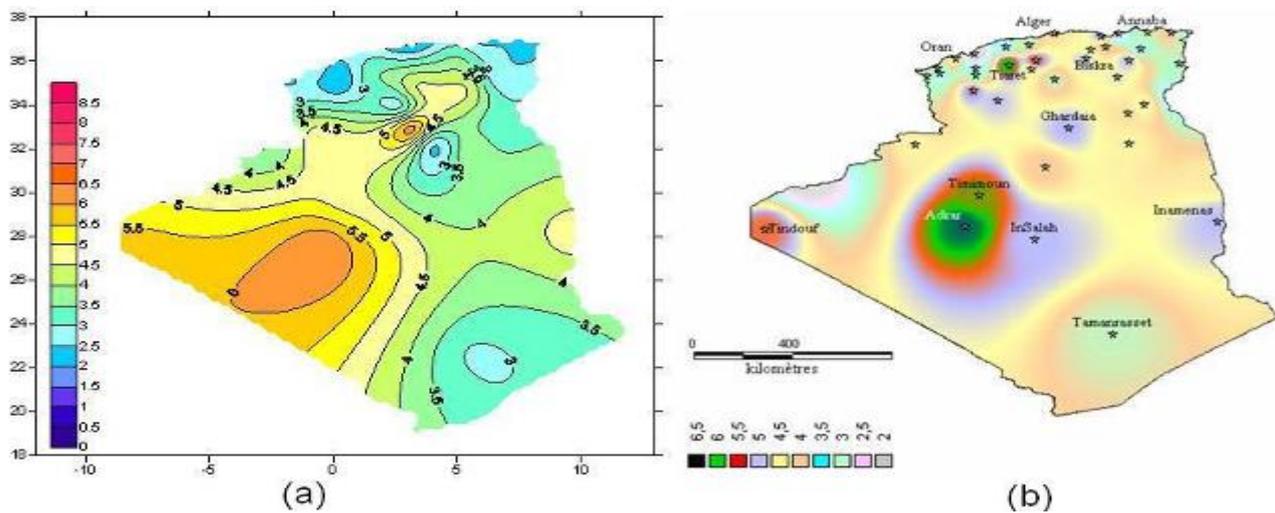
Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent.

De ce fait, plusieurs chercheurs de l'EPST CDER ont depuis quelques années axé leurs recherches dans l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie.

L'étude la plus récente, a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10m [1], en utilisant des données météorologiques plus récentes et un plus grand nombre de points de mesure par rapport aux précédents travaux.

Une autre étude sur le gisement éolien en Algérie fut établie par Dr. Farouk Chellali en 2011 [2-3]. Ce dernier a introduit une analyse spectrale pour étudier le phénomène cyclique du vent et a contribué à l'actualisation de la carte des vents en Algérie en introduisant le site de Hassi-R'Mel qui avait été sous-estimé dans les précédents travaux. A rappeler que Dr. Farouk Chellali a été lauréat du deuxième prix du DESERTEC Thesis Award pour la région MENA par le travail présenté en étudiant le comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie.

L'un des premiers travaux de cartographie éolienne du pays à 10 m de hauteur a été réalisé en 2006 par Dr. Nachida Kasbadji Merzouk [4].



(a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali [2-3]

(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk [4]

Fig-1- 13 Carte du gisement éolien en Algérie

1.1.5.5 Avantage :

- La surface occupée au sol est peu importante;
- L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules);
- surface immense disponible en mer où le vent est pratiquement constant.
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

1.1.5.6 Inconvénients :

- Comme la plupart des aménagements réalisés par l'homme, les éoliennes contribuent à la modification des paysages.
- les éoliennes, ne peuvent pas être implantées n'importe où, ils existent une réglementation stricte à ce sujet, de nombreuses études sont nécessaires avant de pouvoir réaliser un projet.
- Certaines éoliennes émettent des nuisances sonores, mais les nouvelles générations sont peu bruyantes.

- Les éoliennes peuvent avoir des impacts sur le milieu naturel (les oiseaux, flores, faunes sauvage....) où elles sont implantées, mais les précautions prises permettent de diminuer leurs séquences.
- L'énergie produite par les parcs éoliens ne peut être stockée. Elle nécessite un raccordement au réseau électrique, ce qui peut poser un problème.
- La production d'une éolienne est variable.
- Les travaux d'installation d'un parc éolien nécessitent des démarches spécifiques pour le transport et le montage.
- Le raccordement pose quelquefois des problèmes : l'isolement des parcs éoliens le rend souvent couteux (longueur de ligne à enterrer) et il est tributaire de travaux de renforcement du réseau de distribution en cas de besoin.

Chapitre II
La conversion éolienne

Introduction

L'énergie que l'on peut extraire du vent et transformer en électricité constitue un supplément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et hydrauliques. Les sections suivantes décrivent les propriétés du vent ainsi que les technologies utilisées pour la génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne.

A cause de la masse et de la vitesse de l'air en mouvement, le vent possède une énergie cinétique. Si l'on réussit à ralentir cette masse d'air à l'aide d'un dispositif quelconque et à l'amener à l'arrêt complet, on pourra récupérer cette énergie cinétique. C'est justement le rôle d'une turbine éolienne de capter cette énergie mécanique. Cette énergie est transformée en énergie électrique par la génératrice couplée à l'arbre de la turbine.

2 Systemes éoliens :

L'énergie éolienne, fiable, économique et écologique représente la source d'électricité idéale au regard de nombreuses applications. Les systèmes éoliens existent en plusieurs dimensions, allant des microsystemes montés sur un mât, aux turbines de 1,5 mégawatt pouvant alimenter le réseau électrique. La plupart des systèmes autonomes appartiennent à l'une des trois catégories suivantes : les microsystemes (100 W maximum), le mini système (de 100 W à 10 kW) et les petits systèmes (de 10 kW à 50 kW). Les systèmes éoliens exigent que le vent qui les actionne ait une vitesse relativement constante. Ils sont conçus de manière à « enclencher » lorsque la vitesse du vent atteint 15 km/h et à « déclencher » lorsque la vitesse du vent est très élevée, et ce pour que le vent ne les endommage pas. Lorsqu'on détermine si l'énergie éolienne d'un site est suffisante pour faire fonctionner efficacement un système éolien, il est très important de prendre en compte la vitesse annuelle moyenne du vent et le nombre de jours pendant lesquels la vitesse du vent est supérieure à la vitesse d'enclenchement. Comme le vent n'a pas toujours la vitesse suffisante pour enclencher le système éolien, on combine fréquemment celui-ci avec d'autres sources d'énergie comme les panneaux solaires ou une génératrice diesel. Certains systèmes éoliens sont connectés à des batteries : quand la vitesse du vent est inférieure à la vitesse d'enclenchement, on utilise les batteries, et quand la vitesse du vent est suffisante, les turbines chargent ces batteries. Certains systèmes, comme les systèmes de pompage d'eau, n'ont besoin ni de source d'énergie d'appoint ni de batteries.

2.1 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes

d'énergie renouvelable.

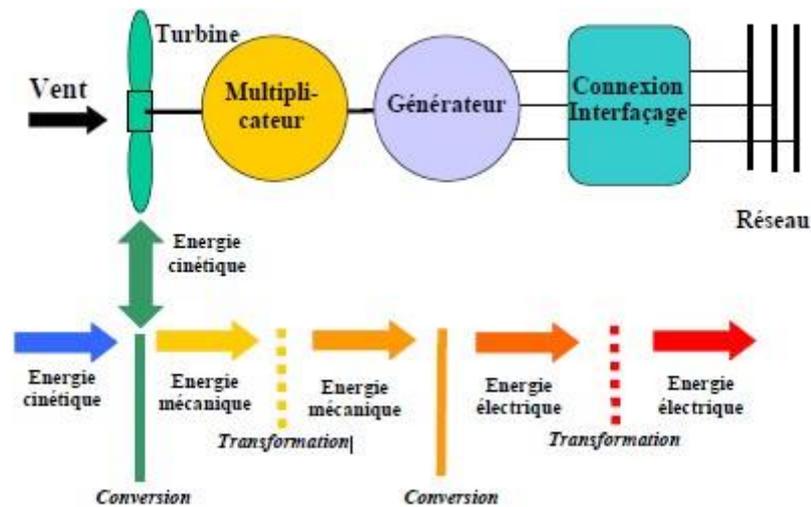


Fig-2- 1 Principe de la conversion d'énergie

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) ;
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

2.2 Éléments constitutifs d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne classique est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour. Chacune de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement :

La nacelle : La nacelle contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales,

l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur, se trouvent :

- La boîte de vitesse
- La génératrice
- Les systèmes de contrôles
- Le capteur de température (huile de la boîte de vitesse afin de distinguer une usure prématurée)
- Le capteur de vibration et le capteur de vitesse (une éolienne commence à tourner à partir de 20km/h, est à sa pleine puissance à 60km/h, et les pales arrêtent de tourner lorsque le vent dépasse 90km/h).

La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol et les pales mesurent (sur une éolienne de 100 mètres) environ 32 mètres.

Le rotor : Il est constitué des pales et du nez (ou moyeu), ainsi que les nombreux dispositifs de commande situés dans le nez.

De nombreuses études en souffleries ont été réalisées afin de déterminer le nombre optimal de pales pour le fonctionnement de l'éolienne.

On a démontré que :

- Moins les pales sont nombreuses, plus l'éolienne met du temps pour démarrer et inversement.
- De plus, lorsque l'éolienne a deux pales, les vibrations sont très fortes et rendent ainsi l'éolienne fragile. Lorsqu'elle en possède plus de trois, les pales sont perturbées par l'air déplacé par la pale précédente. Le rendement s'en trouve ainsi réduit.

Ainsi le nombre optimal de pales pour le fonctionnement d'une éolienne est de trois. Les pales sont torsadées afin d'offrir plus de surface au vent et peuvent aussi s'orienter.

L'ensemble des éléments du rotor qui est reliée au multiplicateur par l'arbre principal est toujours orientée de façon à être face au vent grâce à la girouette et à l'anémomètre.

Les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

La **tour**, la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccordements nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa

hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.

Le moyeu est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.

Le multiplicateur L'arbre principal entraîne le multiplicateur qui par un système complexe d'engrenages va transformer le mouvement lent et puissant de l'axe principal en un mouvement très rapide mais de force plus faible.

Le principe est identique à celui d'un vélo doté de pignon et de plateau. Lorsque l'on met un grand plateau pour un petit pignon, la force exercée sur les pédales directement reliées au plateau va devoir être très puissante le mouvement sera par conséquent assez lent, en revanche le mouvement transmis grâce à la chaîne à l'engrenage des pignons sera beaucoup plus rapide mais moins fort.

La **génératrice** La génératrice est un élément indispensable pour une éolienne, c'est elle qui permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est soit directement sur l'axe de l'aéromoteur, soit entraînée par un multiplicateur.

Il existe 2 types de génératrice (ou générateur) :

- La dynamo qui permet de fournir un courant continu directement utilisable.
- L'alternateur qui permet de fournir une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation. L'alternateur crée un courant en faisant tourner des bobines ou des aimants, placés sur le rotor et qui créent ainsi un champ magnétique. Il nécessite donc un convertisseur et est utilisé plus particulièrement par les éoliennes domestiques.

Nous pouvons préciser afin d'éviter les confusions que sur un vélo, le système appelé dynamo par abus de langage est en réalité un alternateur et non une dynamo (dans son sens défini ci-dessus).

L'**arbre lent** de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur.

L'**arbre rapide** tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de direction est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état

de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.

La fondation est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

L'armoire de couplage au réseau électrique transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.

Le système de freinage Un système de freinage est très important dans une éolienne le disfonctionnement des freins peut être fatal à l'éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les ingénieurs lors des débuts des éoliennes.

Pour des vents trop forts le générateur « s'emballe » et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassant les 90km/h il permet alors d'empêcher le rotor de tourner.

L'anémomètre mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.

La girouette indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.

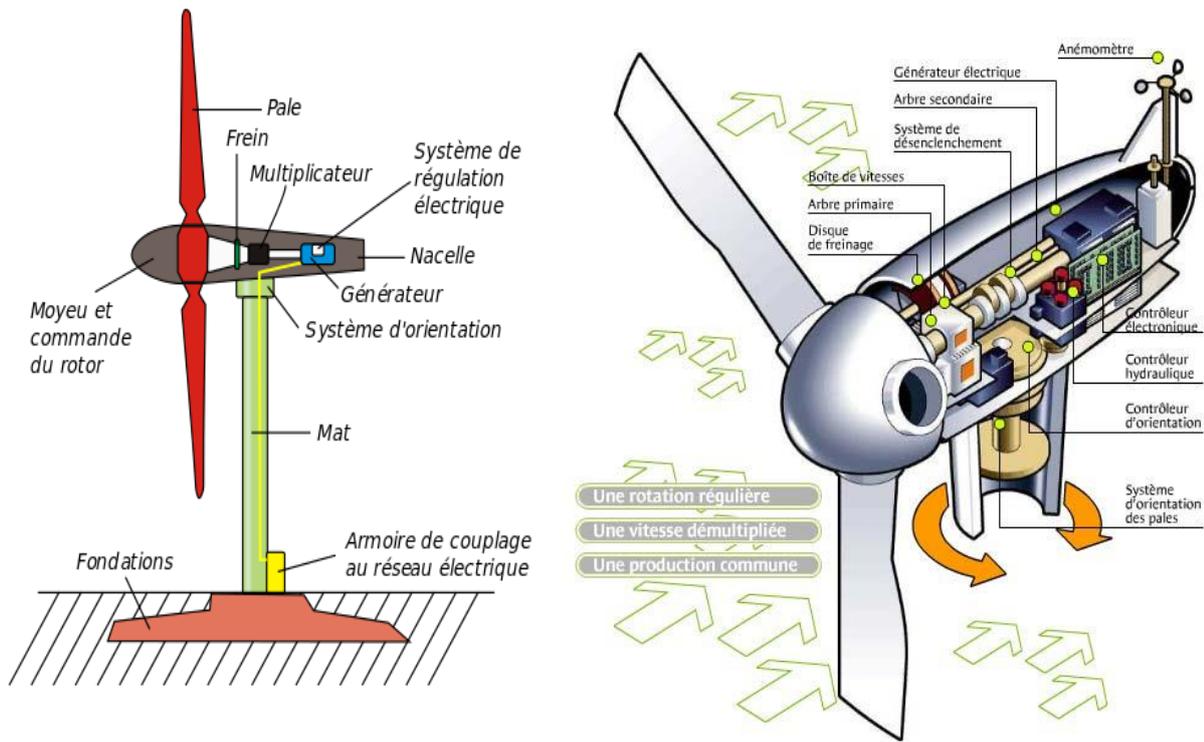


Fig-2- 2 Eléments constitutifs d'une éolienne

2.3 Classification

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât, L , soit égale au diamètre du rotor, D . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées. Attention, il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance. Le but est uniquement de se donner une idée. En outre, cette puissance n'a de sens que si on a défini la vitesse de vent à laquelle elle est délivrée.

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

Tableau 2.1 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.

Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- **Micro-éoliennes** : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- **Mini-éoliennes** : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).
- **Eoliennes domestiques** : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.
- **Eoliennes petites commerciales** : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- **Eoliennes moyennes commerciales** : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.
- **Eoliennes grands commerciales** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.

2.4 Fonctionnement d'une éolienne :

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible.

Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau.

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

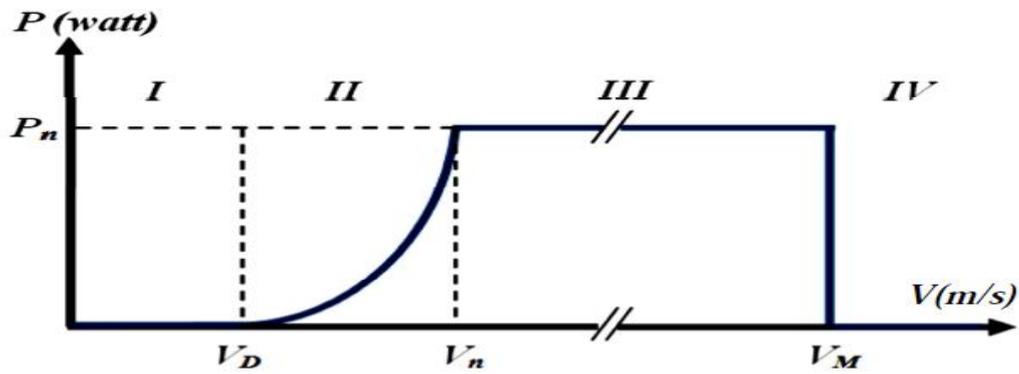


Fig-2- 3 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance ;

V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_n varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies ;

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s.

Zone I : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure. La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées. La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

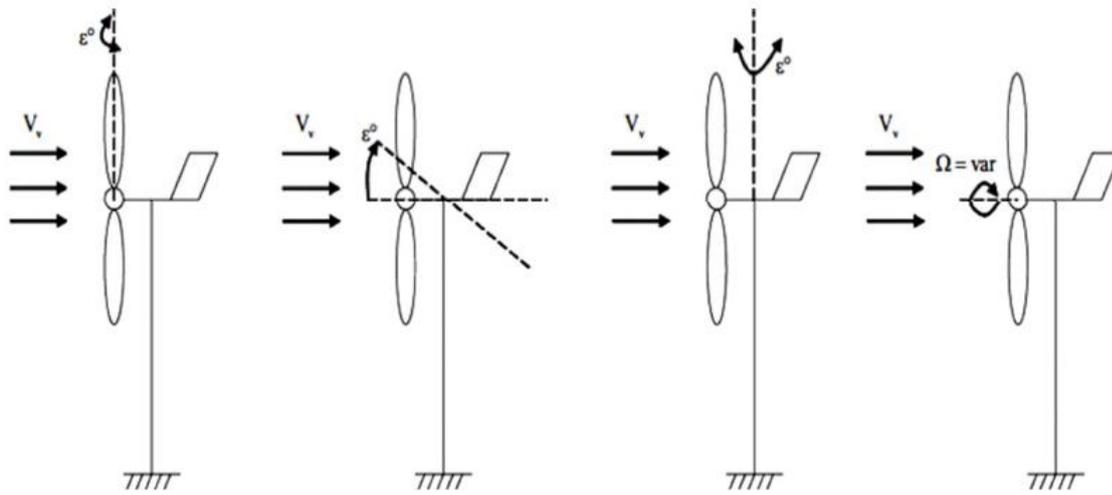


Fig-2- 4 Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment Variable

2.5 Etat de l'art sur la conversion électromécanique :

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors tourne à vitesse «fixe» ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone [16]. Si le générateur est lié indirectement au réseau, (figure I.3 et figure I.14) L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ce convertisseur autorise le fonctionnement à vitesse variable de ce type de chaîne permettant d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

2.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une

très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écurueil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS [16]. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage / décrochage au réseau.

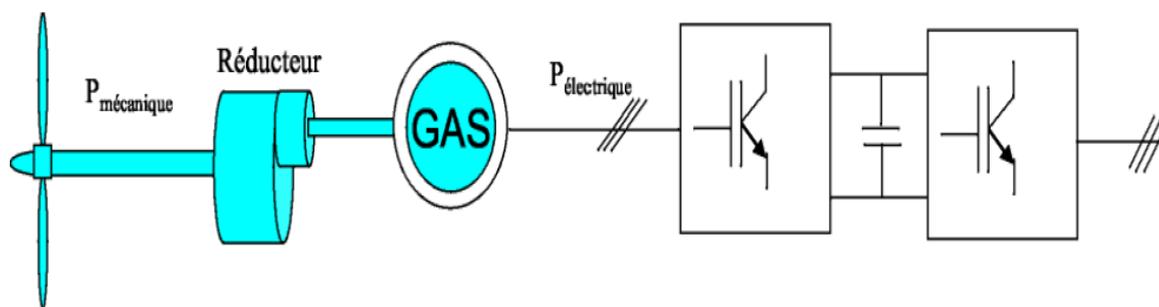


Fig-2- 5 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

2.6 Systèmes utilisant la machine synchrone :

Enfin, tout particulièrement dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs performances, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable. Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses. Le principal fabricant est Enercon (plusieurs milliers de machines de 300 kW, 600 kW, 1 MW et 1.8 MW sont déjà en service). L'inducteur (rotor) est bobiné nécessite un système bagues lisses-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI. Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (Jeumont Industrie, 750 kW) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années.

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur Made (gamme au-delà de 800 kW). Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel ils sont connectés comme le montre la.

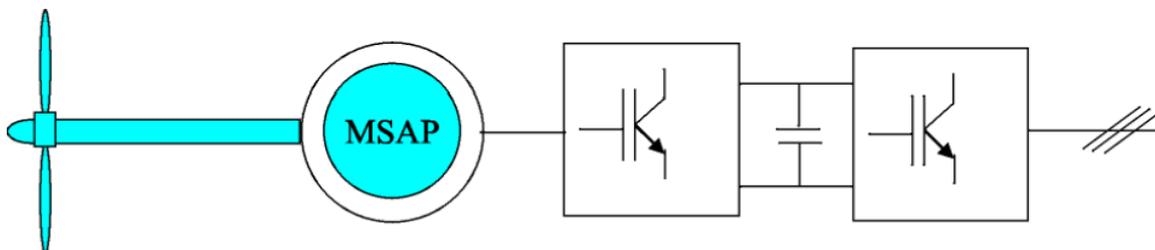


Fig-2- 6 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

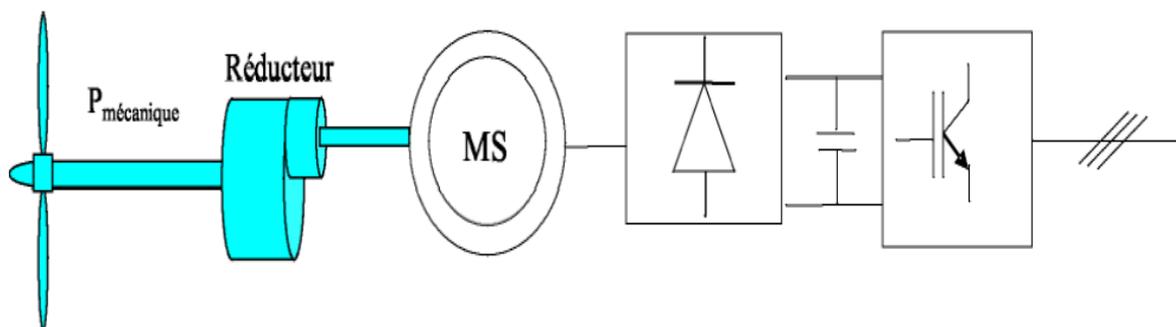


Fig-2- 7 Système basé sur la machine synchrone et redresseur à diodes

De nos jours, dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne, l'intérêt se porte sur l'utilisation de génératrices électriques tournant à basse vitesse sans multiplicateur. Celui-ci est en effet une source de bruit et de pannes fréquentes.

Plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché [8]; la structure à base de machine synchrone connectée directement au réseau est une solution simple et robuste, c'est la structure la plus ancienne (éoliennes à vitesse fixe).

Dans ce sens, ce deuxième chapitre sera aussi consacré à la modélisation de la turbine éolienne connecté à un générateur synchrone.

2.7 Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien

2.8 Modélisation de la turbine éolienne :

2.8.1 Puissance et couple aérodynamique de l'éolienne :

La puissance éolienne du vent est exprimée par la relation (II.1) :

$$P = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V^3 \quad \text{II.1}$$

Avec S la surface balayée par les pales de l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air et V la vitesse du vent.

$$S = \pi R_p^2 \quad \text{II.2}$$

R_p : Rayon de la turbine (représente aussi la longueur de la pale).

La puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine P_T s'écrit sous la forme suivante :

$$P_T = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad \text{II.3}$$

Le coefficient de puissance c_p est en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de calage des pales β .

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, généralement valables pour une turbine particulière. Chaque turbine a un comportement spécifique. Dans ce travail on considère l'expression du coefficient de puissance donnée par la relation suivante [4]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad \text{II.4}$$

Avec:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad \text{II.5}$$

Où:

$$\lambda = \frac{R_p \Omega_T}{V} \quad \text{II.6}$$

Et;

Ω_T : Vitesse de la turbine.

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$: sont des coefficients dépendent de la turbine considérée.

Sur la (Figure II.1), plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet ($\beta = 0$). Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8.1$; $C_{pmax} = 0.475$); qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de réduire le coefficient C_p et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

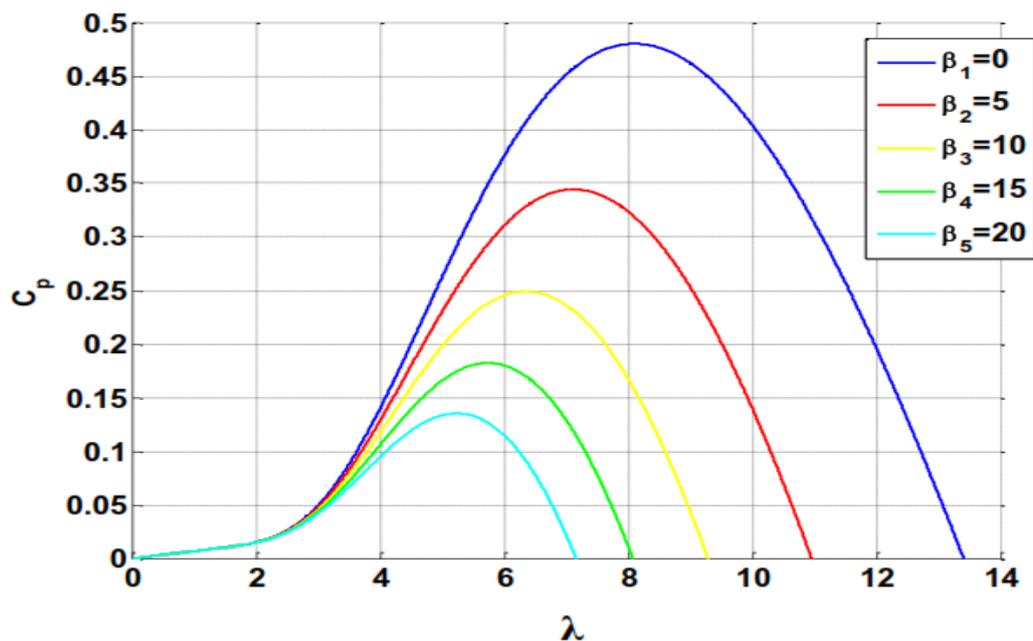


Fig-2- 8 Courbe de coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$

Ainsi l'expression du couple aérodynamique T_T est :

$$T_T = \frac{P_T}{\Omega_T} \quad \text{II.7}$$

2.8.2 Fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanent :

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- Les machines synchrone à rotor bobiné.
- Les machines synchrone à réluctance.
- Les machines synchrone à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé) la machine synchrone à aimants permanents est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance

Le stator de la machine synchrone à aimants permanents est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$.



Fig-2- 9 Stator de la machine synchrone

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

La machine que nous étudierons, dans ce mémoire est à pôles saillants.

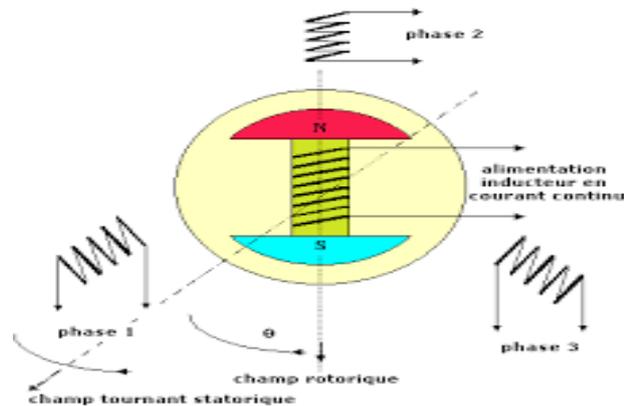


Fig-2- 10 Rotor avec pièces polaires

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteur) à plusieurs méga Watts (système de propulsion des navires) dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse variable, et la traction.

- Il fonctionne comme compensateur synchrone.
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseurs de puissance a trouvé de nombreuses applications dans des domaines très divers telles que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique,...).

Conclusion

La turbine associée au générateur synchrone fera l'objet du modèle de l'ensemble à simuler par Matlab Simulink

Chapitre 3
Simulation d'une ferme
Eolienne connecté au réseau

3 Simulation d'une ferme Eolienne connecté au réseau

3.1 La description :

Un parc éolien composé de six éoliennes de 1,5 MW est connecté à un système de distribution de 25 kV et exporte de l'énergie vers un réseau de 120 kV via un départ de 25 km. Le parc éolien de 9 MW est simulé par trois paires d'éoliennes de 1,5 MW. Les éoliennes utilisent des générateurs à induction à cage d'écureuil. L'enroulement du stator est connecté directement à la grille de 60 Hz et le rotor est entraîné par une éolienne à pas variable. L'angle d'inclinaison est contrôlé afin de limiter la puissance de sortie du générateur à sa valeur nominale en cas de vents supérieurs à la vitesse nominale (9 m / s). Pour générer de l'énergie, la vitesse IG doit être légèrement supérieure à la vitesse synchrone. La vitesse varie approximativement entre 1 unité centrale à vide et 1,005 unité centrale à pleine charge. Chaque éolienne est dotée d'un système de protection surveillant la tension, le courant et la vitesse de la machine. La puissance réactive absorbée par les générateurs est compensée en partie par des batteries de condensateurs connectées sur chaque bus basse tension d'éoliennes (400 kvar pour chaque paire d'éoliennes de 1,5 MW). Le reste de la puissance réactive nécessaire au maintien de la tension de 25 kV sur le bus B25 à près de 1 unité centrale est fourni par un STATCOM à 3 Mvar avec un réglage d'abaissement de 3%. Ouvrez le bloc "Parc éolien" et regardez "Éolienne 1". . Ouvrez le menu de la turbine et examinez les deux jeux de paramètres spécifiés pour la turbine et le générateur. Chaque bloc éolien représente deux turbines de 1,5 MW. Ouvrez le menu Turbines, sélectionnez "Données de la turbine" et cochez la case "Afficher les caractéristiques de puissance de l'éolienne". La puissance mécanique de la turbine en fonction de sa vitesse est indiquée pour des vitesses de vent allant de 4 à 10 m / s. La vitesse nominale du vent donnant la puissance mécanique nominale (1pu = 3 MW) est de 9 m / s. Le modèle d'éolienne et le modèle statcom (de la bibliothèque FACTS) sont des modèles de phaseur qui permettent des études de type de stabilité transitoire avec des temps de simulation longs. Dans cet exemple, le système est observé pendant 20 s. La vitesse du vent appliquée à chaque turbine est contrôlée par les blocs "Vent 1" à "Vent 3". Initialement, la vitesse du vent est fixée à 8 m / s, puis à partir de $t = 2s$ pour "Éolienne 1", la vitesse du vent est ramenée à 11 m / s en 3 secondes. La même rafale de vent est appliquée à la turbine 2 et à la turbine 3, respectivement avec des retards de 2 secondes et 4 secondes. Ensuite, à $t = 15 s$, un défaut temporaire est appliqué aux bornes basse tension (575 V) de "l'éolienne 2".

3.2 Simulation de la turbine :

Réponse à une modification de la vitesse du vent Lancez la simulation et observez les signaux du champ "Eoliennes" en contrôlant la puissance active et réactive, la vitesse de l'alternateur, la vitesse du vent et l'angle d'inclinaison de chaque éolienne. Pour chaque paire d'éoliennes, la puissance active générée commence à augmenter progressivement (ainsi que la vitesse du vent) pour atteindre sa valeur nominale de 3 MW en 8 s environ. Au cours de cette période, la vitesse de la turbine sera passée de 1,0028 à 1,0047 unités. Initialement, l'angle d'inclinaison des aubes de la turbine est de zéro degré. Lorsque la puissance de sortie dépasse 3 MW, l'angle d'inclinaison augmente de 0 à 8 degrés afin de ramener la puissance de sortie à sa valeur nominale. Observez que la puissance réactive absorbée augmente à mesure que la puissance active générée augmente. À la puissance nominale, chaque paire d'éoliennes absorbe 1,47 Mvar. Pour une vitesse de vent de

11 m / s, la puissance totale exportée mesurée sur le bus B25 est de 9 MW et le statcom maintient la tension à 0,984 pu en générant 1,62 Mvar (voir les étendues "Bus B25" et "Statcom").

3.2.1 Fonctionnement du système de protection :

À $t = 15$ s, un défaut entre phases est appliqué aux bornes de l'éolienne 2, provoquant le déclenchement de l'éolienne à $t = 15,11$ s. Si vous regardez à l'intérieur du bloc "Protections d'éoliennes", vous verrez que le déclenchement a été initié par la protection contre les surtensions CA. Après le déclenchement de la turbine 2, les turbines 1 et 3 continuent de générer chacune 3 MW.

3.2.2 Impact de STATCOM :

Vous allez maintenant observer l'impact du "STATCOM". Tout d'abord, ouvrez le menu de bloc "Défaut triphasé" et désactivez le défaut entre phases. Puis mettez le "STATCOM" hors service en double-cliquant sur le bloc "Manual Switch" connecté à l'entrée "Trip" du "STATCOM". Redémarrez la simulation. Observez sur l'oscilloscope "B25 Bus" qu'en raison du manque de puissance réactive, la tension sur le bus "B25" chute maintenant à 0,91pu. Cette condition de basse tension entraîne une surcharge de l'IG de "l'éolienne 1". "L'éolienne 1" est déclenchée à $t = 13,43$ s. Si vous regardez à l'intérieur du bloc "Protections d'éoliennes", vous verrez que le déclenchement a été initié par la protection contre les surintensités CA.

3.2.3 Simulation :

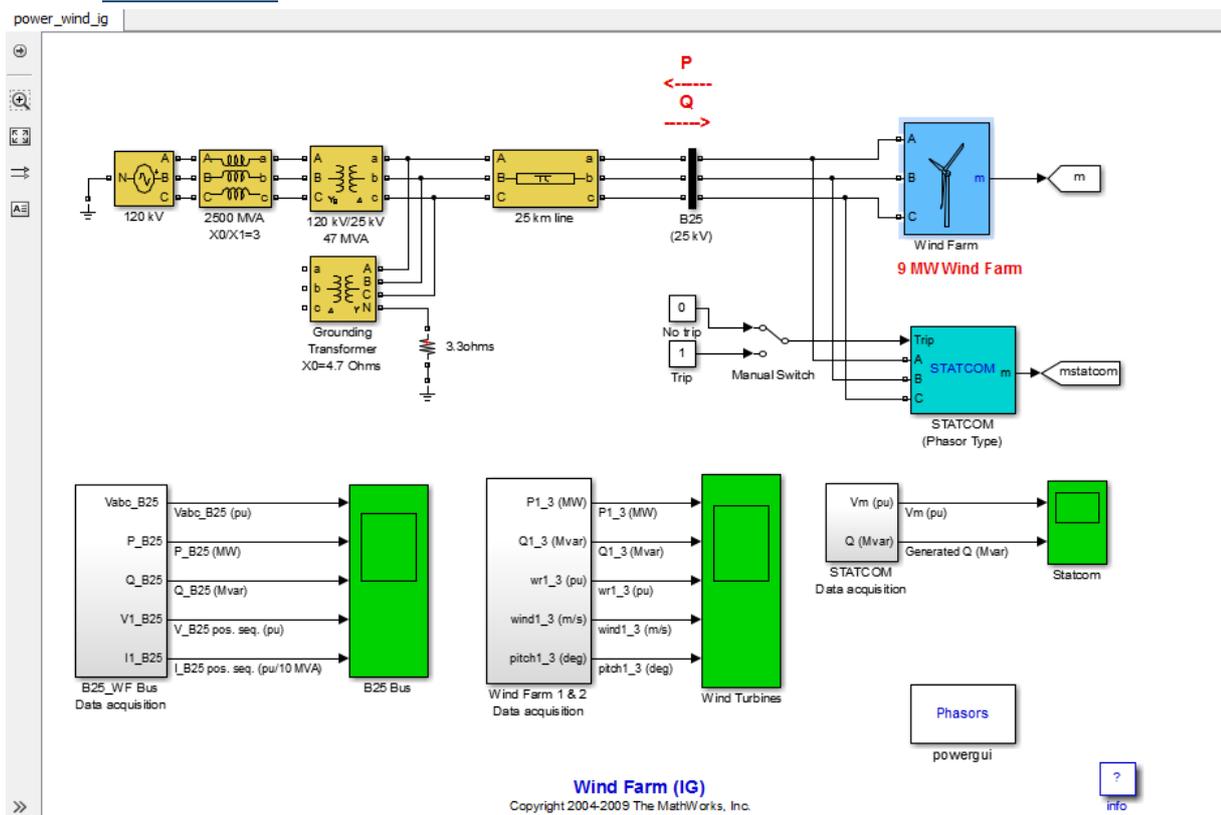


Fig-3- 1 Simulation de la turbine Eolienne connecté au réseau

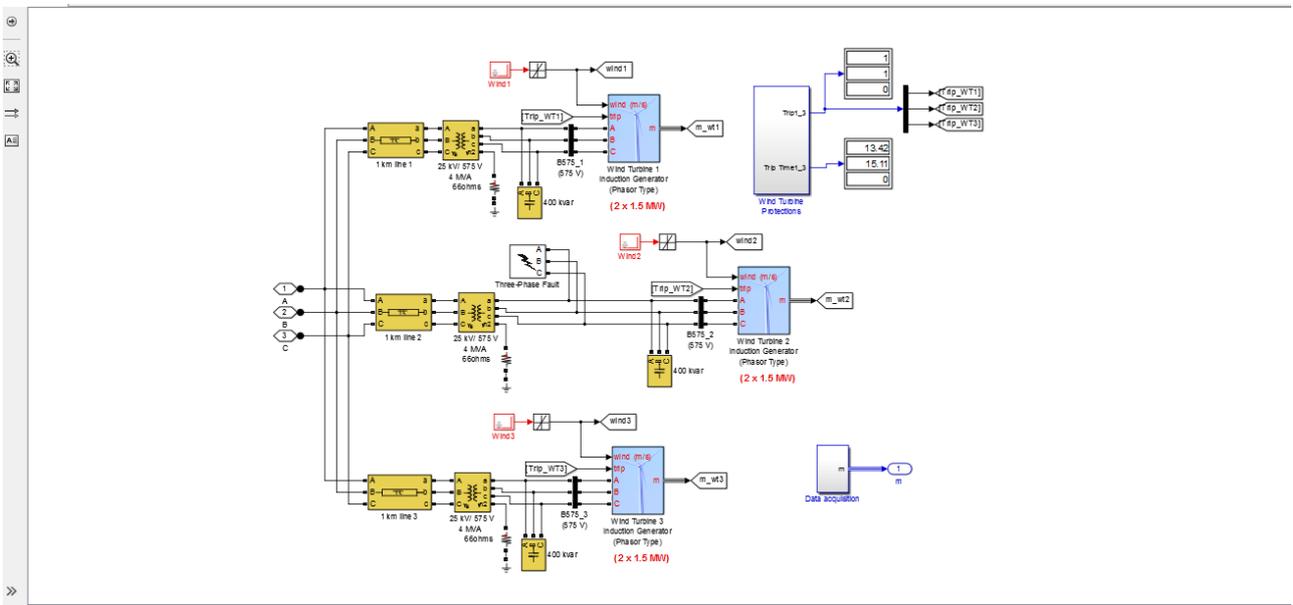


Fig-3- 2 Ferme éolienne

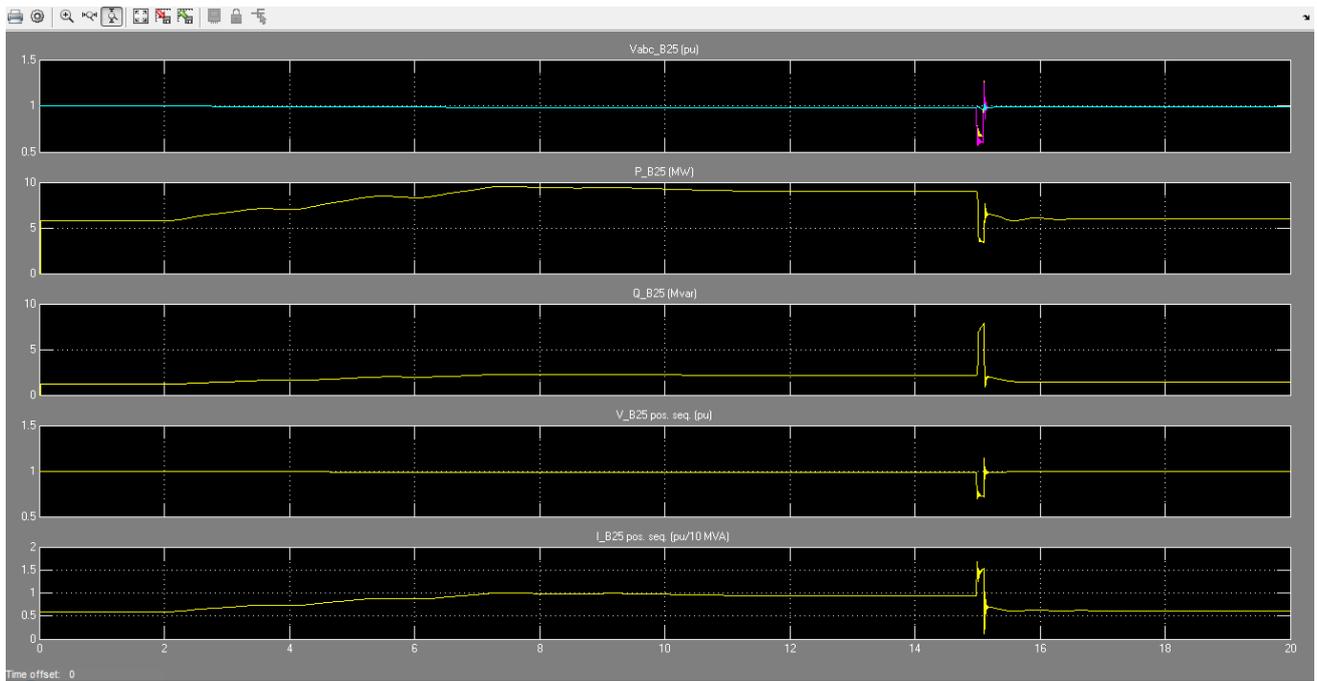


Fig-3- 3 Paramètre du réseau

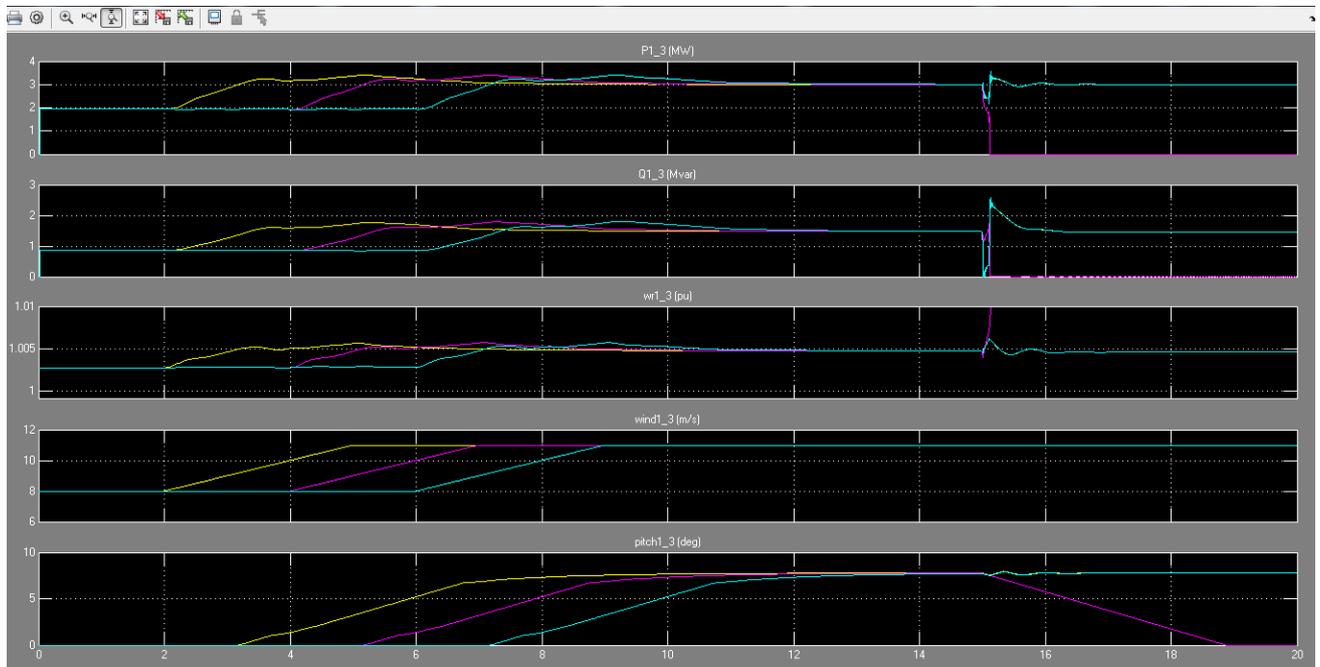


Fig-3- 4 Paramétré de la ferme éolienne

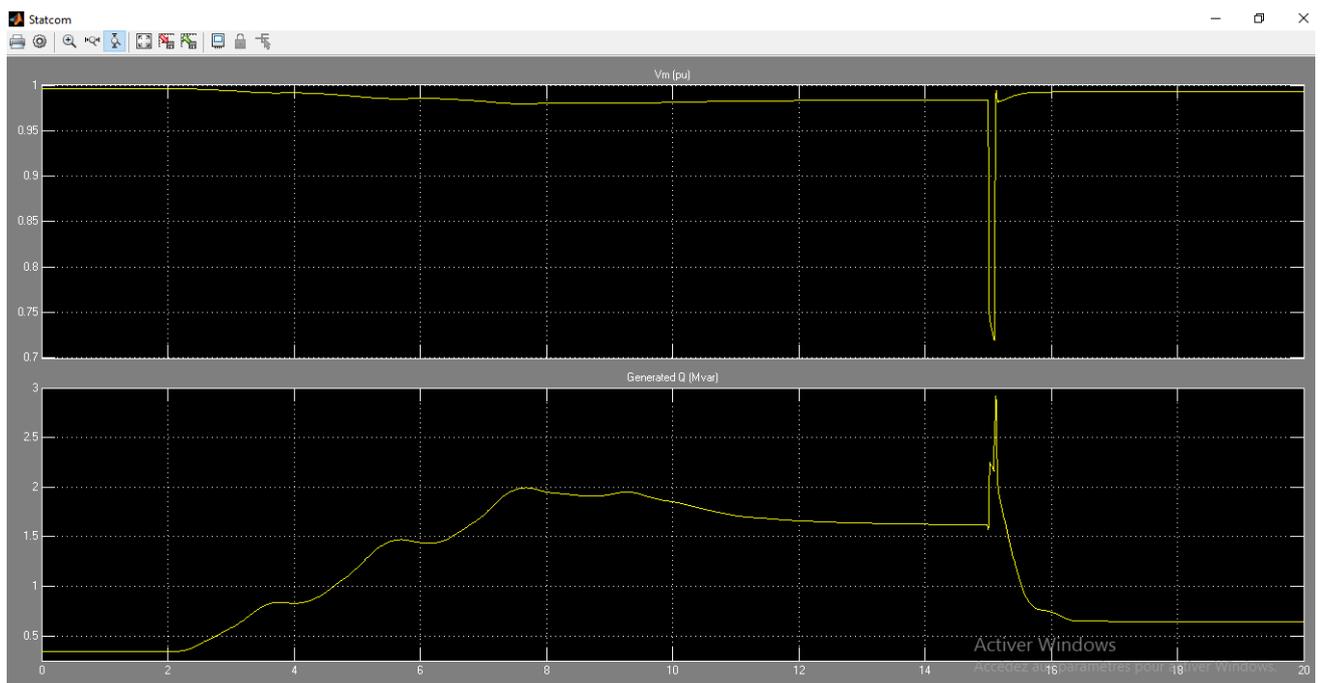
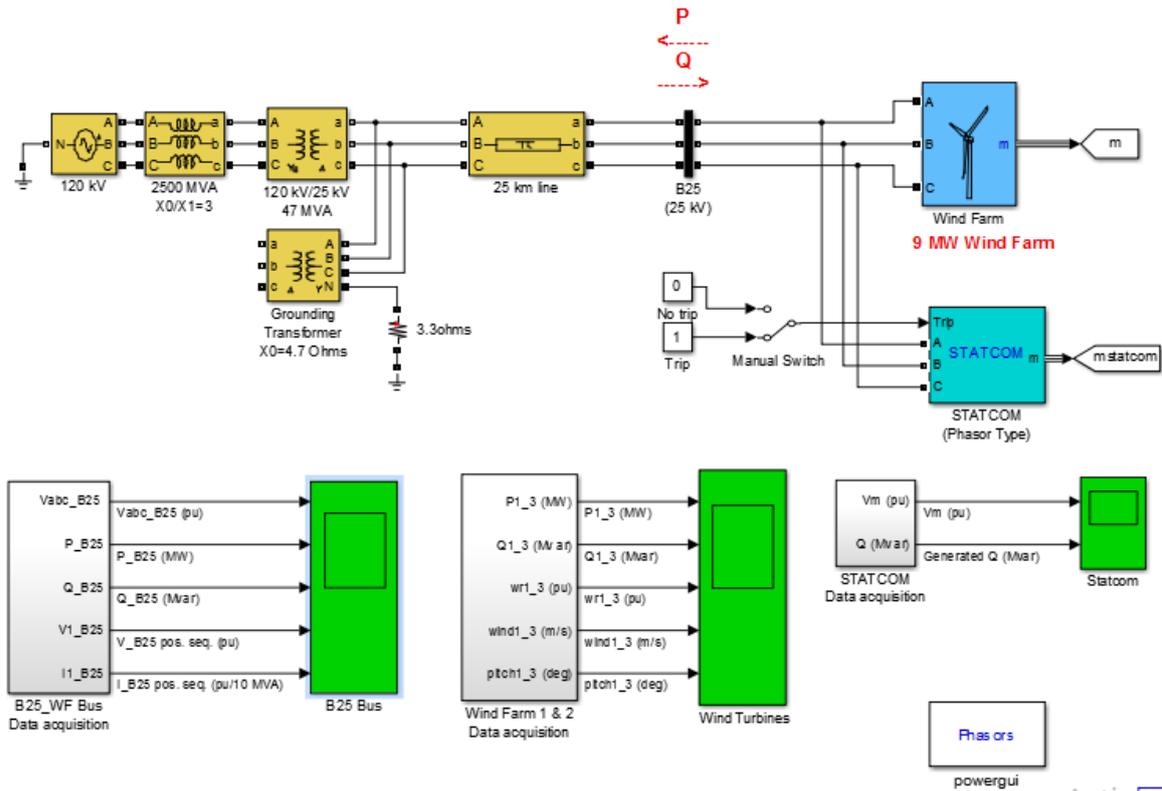


Fig-3- 5 Paramètre Statcom

3.2.4 Simulation sans statcom :



Wind Farm (IG)
Copyright 2004-2009 The MathWorks, Inc.

ActiveWind
Accès aux pa

Fig-3- 6 Simulation de la turbine Eolienne connecté au réseau

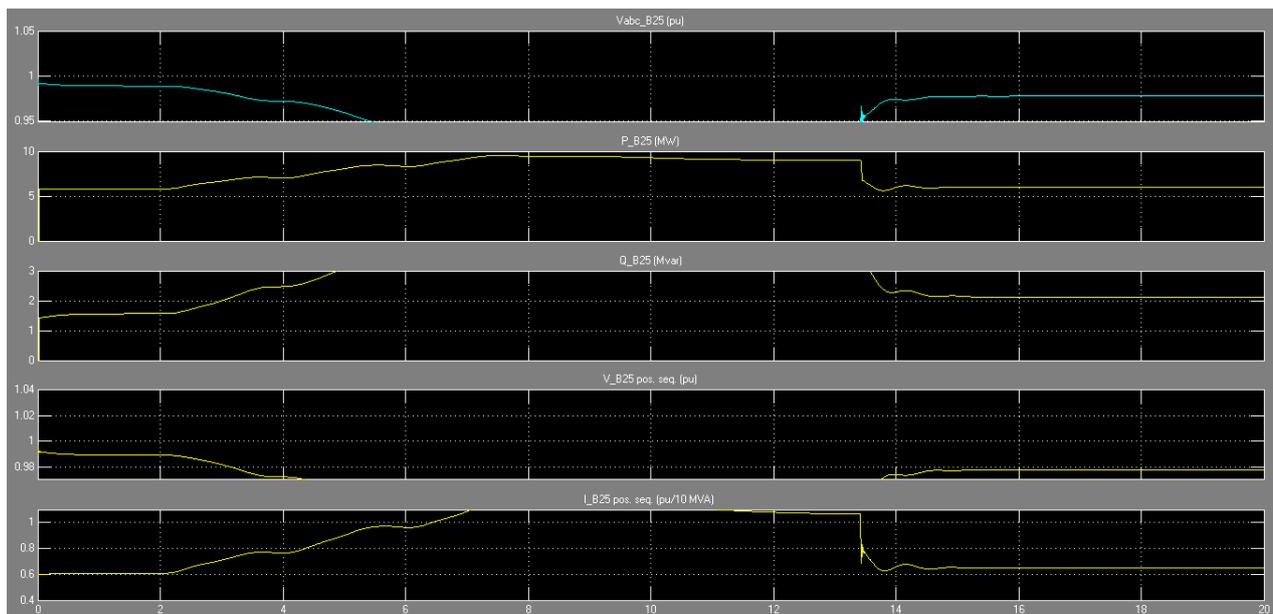


Fig-3- 7 Paramètre du réseau

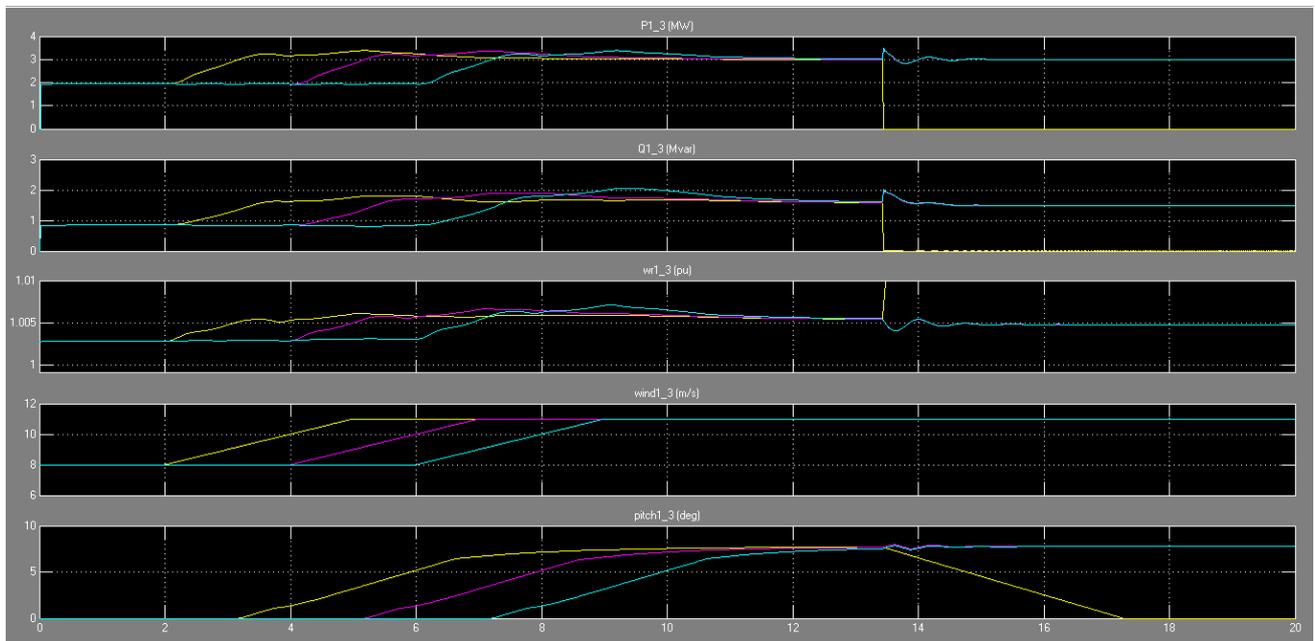


Fig-3- 8 Paramétré de la ferme éolienne

4 Conclusion générale :

Cette étude sur les énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie éolienne nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la conversion de l'énergie éolienne en électricité. Cette énergie propre et renouvelable offre un investissement important pour Sonalagaz.

L'utilisation de la turbine éolienne nous a permis de créer une puissance mécanique sur l'arbre du générateur. Cette puissance est importante et non polluante. L'utilisation des blocs de la bibliothèque Simulink ont facilité énormément la modélisation.

5 Bibliographie :

- [1] Raphael clautre, Mike Junk : énergies renouvelables 'en finir avec les idées reçues' Maison de publication impro, Montreuil, 2015
- [2] [Http : FR .wikipedia-org /wiki/SMES](http://fr.wikipedia.org/wiki/SMES) : 'quel sont les sources d'énergie renouvelable' 24 /04/2016 a 14 :00
- [3] Abdelhamid Lilia 'contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliennes-évaluation de l'impact des énergies renouvelable sur l'environnement', thèse doctorat en science en électrotechnique /Batna/2012
- [4] Redjem radia : 'étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne', magistère en électrotechnique/Constantine/2009
- [5] Gabriel-Octavian cimuca : 'système inertiel de stockage d'énergie associe a des générateurs éoliennes'.thèse doctorat/école nationale supérieure d'arts et métiers centre de Lille/2005
- [6] J.Martin, énergie éoliennes : 'techniques de l'ingénieur, traité de génie énergétique', pp B 8585 1- B 858521/Batna 2004
- [7] F.Poitiers, 'étude et commande de génératrices synchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne' .thèse de doctorat de l'université de Nantes ,2003
- [8] Saltane Belakehal : 'conception et commande des machines a aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables'/thèse doctorat en science/Constantine ,2010
- [9] [http : www.mathwork file exchange](http://www.mathworks.com/file_exchange) (internet) simulation sur Matlab.

6 Liste de figures

fig-1- 1 Centrale électrique thermique solaire.....	5
Fig-1- 2 Centrale photovoltaïque.....	6
Fig-1- 3 centrale hydraulique.....	7
Fig-1- 4 Centrale hydroélectrique	8
Fig-1- 5 L'énergie géothermique.....	10
Fig-1- 6 usine biomasse	11
Fig-1- 7 éolien	13
Fig-1- 8 éolien onshore-offshore	13
Fig-1- 9 éolien Darrieus	14
Fig-1- 10 éolien Savonius.....	15
Fig-1- 11 éolienne sans pales.....	16
<hr/>	
Fig-1- 12 Hydrolienne	16
Fig-1- 13 Carte du gisement éolien en Algérie	19
Fig-2- 1 Principe de la conversion d'énergie	23
Fig-2- 2 Eléments constitutifs d'une éolienne	27
Fig-2- 3 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.	29
Fig-2- 4 Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment Variable	30
Fig-2- 5 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable	31
Fig-2- 6 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents	32
Fig-2- 7 Système basé sur la machine synchrone et redresseur à diodes	32
Fig-2- 8 Courbe de coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$	34
Fig-2- 9 Stator de la machine synchrone	35
Fig-2- 10 Rotor avec pièces polaires	36