



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



UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de technologie

Département de Mécanique

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Energies Renouvelables

Thème

**Etude comparative des performances
d'un aérogénérateur en fonction du
type de convertisseur électrique**

PRESENTE PAR :

Mr MENOUEI Sid Ahmed

ENCADRE PAR :

Dr. HAMMANE

ANNEE UNIVERSTAIRE 2014/2015

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie le bon dieu, le tout puissant de m'avoir donné la force nécessaire pour mener à terme ce travail.

Ensuite, je voudrait exprimer ma reconnaissance à M^{me}HAMANE pour son encadrement efficace, MrBENACEUR pour son soutien et sa disponibilité. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'exprime ma profonde gratitude à tous les enseignants qui m'ont soutenu durant la période de mes études. Enfin, je remercie, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, de même que ceux qui ont participé à ma formation, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé : L'objet de ce travail est d'étudier les performances d'un aérogénérateur en fonction de différents convertisseurs électriques utilisés afin de convertir l'énergie mécanique produite par une éolienne en énergie électrique utilisable. Il s'agit de répondre à la problématique des variations intermittentes de la vitesse du vent afin d'obtenir une énergie éolienne électrique la plus stable possible.

En première étape, une étude bibliographique sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique sera entreprise afin d'étudier et comparer le fonctionnement des configurations des systèmes existants. En seconde étape, les performances des différents systèmes éoliens seront estimées grâce à une étude de cas. Pour cela un échantillon de vitesse du vent horaire sera utilisé.

Cette étude va nous permettre de connaître les avantages et les limites des convertisseurs électriques existants afin d'optimiser la conversion éolienne et améliorer les performances des éoliennes.

Summary: The purpose of this work is to study the performance of a wind turbine according to different electric converters used to convert mechanical energy generated by a Wind Turbine into usable electrical energy. This is the answer to the problem of intermittent changes in the wind speed in order to get an electric wind power as stable as possible.

As a first step, a literature study on the conversion of wind energy into electrical energy are undertaken to study and compare the functioning of existing systems configurations.

In the second stage, the performance of different wind systems is estimated through a case study (In Salah location). For this sample a Three-Hourly Wind speed is used.

This study will allow us to know the advantages and limitations of existing electrical converters to optimize wind turbine conversion and improve the performance of wind turbines.

ملخص :

إن الهدف من هذا العمل هو دراسة أداء توربينات الرياح وفقا لمحولات الكهربائية المختلفة المستخدمة لتحويل الطاقة الميكانيكية التي تولدها توربينات الرياح إلى طاقة كهربائية يمكن استخدامها.

لغرض إيجاد الحل لمشكلة التغيرات المتقطعة في سرعة الرياح من أجل الحصول على طاقة كهربائية مستقرة بقدر الإمكان .

كخطوة أولى، تم إجراء دراسة مكتبية على موضوع تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية ومقارنة أداء تكوينات النظم القائمة. في المرحلة الثانية، تم تقدير أداء نظم الرياح المختلفة من خلال دراسة حالة. وهذه العينة يتم استخدام سرعة الرياح كل ثلاث ساعة وهذه الدراسة أتاحت لنا معرفة مزايا وقيود المحولات الكهربائية القائمة لتحسين تحويل توربينات الرياح وتحسين أدائها.

Sommaire

Introduction Générale.....	.....
Chapitre 1:Etat de L'art des systems de conversion d'energie eolienne	
1-1 introduction .....	.....
1.2 Développement de l'énergie éolienne.....	.....
1.2.1 Historique.....	.....
1.2.2 Principaux producteurs d'énergie éolienne dans le monde.....	.....
1.2.3 Etat de l'art sur la conversion électrique.....	.....
1.3 Quelques notions sur le vent.....	.....
1.3.1. Caractéristiques du vent.....	.....
1.3.2. La hauteur de la couche limite atmosphérique(CLA).....	.....
1.4 L'Aérogénérateur.....	.....
1.5.1 Aérogénérateur à Axe Vertical.....	.....
1.5.1.1 Aérogénérateurs à Rotor de Darrieus.....	.....
1.5.1.2 Aérogénérateurs à Rotor de Savonius.....	.....
1.5.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal.....	.....
1.6 Principales composantes des aérogénérateurs à axe horizontal.....	.....
1.7 Puissance récupérable par une turbine.....	.....
1.8 Régulation mécanique de la puissance d'un aérogénérateur.....	.....
1.9 Avantages et Inconvénient des Machines à Axe Horizontal.....	.....
1.10 Conclusion.....	.....
Chapitre 2 : Energie éolienne et conversion électrique	
2.1 Introduction.....	.....
2.2 Gisement éolien.....	.....
2.2.1 Modelisation Mathematique De La Distribution Des Frequences Du Vent.....	.....
2.3 Conversion de l'energie.....	.....
2.3.1 Installation en mode autonome.....	.....
2.3.2 Installation réseau.....	.....
2.3.2.1 Fonctionnement des aérogénérateurs à vitesse fixe.....	.....
2.3.1.1 Machine asynchrone à cage.....	.....
2.3.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator.....	.....
2.3.2 Fonctionnements sous vitesse variable.....	.....
2.3.2.1 Système Utilisant Une Génératrice Synchronne.....	.....

2.3.2.2	Système Utilisant une génératrice Asynchrone.....
2.4	Convertisseurs de Fréquence.....
2.5	Caractéristiques des différentes éoliennes.....
2.6	Conclusion.....
Chapitre 3 : Etude de Cas	
3.1	Introduction.....
3.2	Presentation des logiciels.....
3.2.1	Le logiciel Wasp (Wind Analysis and application Program).....
3.2.2	WindFarmer.....
3.3	Simulation et résultats.....
3.3.1	Gisement éolien.....
3.3.2	Production électrique.....
3.5	Conclusion.....
Conclusion Générale	
Annexes ...	
Bibliographie	

Introduction Générale.

Les énergies renouvelables, issues du soleil, du vent ou de la mer, ont longtemps été présentées comme la solution ultime aux problèmes énergétiques que connaît notre civilisation, offrant l'avantage d'être illimitées et non polluantes, mais pas toujours disponibles à un prix "bon marché".

Les facteurs clé déclencheur de l'intérêt initial porté aux énergies renouvelables, la présence en quantité du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère qui est rejetée par les secteurs de l'industrie pour produire de l'électricité en utilisant les combustibles fossiles, les crises pétrolières des années 1970, les craintes d'épuisement des ressources énergétiques et l'insécurité politique. En conséquence, ce nouveau domaine d'intérêt, le "renouvelable", a connu un bond significatif, traduit par un développement accru des activités liées aux domaines des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont des énergies très faiblement émettrices de GES (gaz à effet de serre). Comme le nucléaire, diront certains. Mais à la différence du nucléaire, elles sont inépuisables, ne produisent que très peu de déchets et le risque de catastrophe est incomparable. Elles ne mettent pas en danger l'environnement et la santé humaine.

Le Sommet de la [Terre](#), à [Rio](#) en 1992, a marqué la prise de conscience internationale du risque de changement climatique. Les états les plus riches, pour lesquels une baisse de croissance ne semblait plus supportable et qui étaient en outre responsables des émissions les plus importantes des GES (Gaz à effet de serre), avaient pris l'engagement de les stabiliser en 2000. C'est le Protocole de Kyoto, en 1997, qui traduit en engagements quantitatifs juridiquement contraignants cette volonté.

En février 2011 le Gouvernement Algérien a adopté un programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030, qui se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par le pays.

D'après L'initiative industrielle pour l'électricité des déserts (**Dii**), le promoteur du projet Desertec estime que la rive sud de la méditerranéenne dispose d'un potentiel énorme en énergie éolienne. Dans une analyse rendue publique, Dii juge que les conditions météorologiques au sud de la Méditerranée sont particulièrement propices au développement de l'éolien terrestre, avec une vitesse des vents atteignant les 10 m/s à une hauteur de 50 m sur certains sites au Maroc, en Algérie et en Egypte notamment. Sur les coûts de l'éolien, le consortium Dii, note que cette énergie peut concurrencer celle des centrales électriques

servant à satisfaire la charge de base et intermédiaire. (Site maghrebemergence.info du 15/02/2014)

L'énergie éolienne connaît depuis quelques années un intérêt croissant en Algérie et à l'international. Renouvelable, mature et compétitive, cette énergie d'avenir a un rôle majeur à jouer pour répondre aux défis climatiques actuels et futurs.

les potentiels sont énormes, en Algérie: excellentes conditions de vent et des conditions de financement locales favorables.

Notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'étude des performances d'un aérogénérateur en fonction de différents convertisseurs électriques pour convertir l'énergie mécanique éolienne en une énergie électrique.

Le premier chapitre repose sur l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

On commencera par une introduction, un peu d'histoire sur l'éolienne, un petit aperçu sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde avec quelques détails sur ce qui a été fait et réalisé jusqu'à présent en termes de puissance, tout en évoquant les principaux producteurs d'énergies éoliennes dans le monde, nous citerons quelques notions sur le vent ensuite nous passerons aux aérogénérateurs, voir les différents types d'aérogénérateurs, leurs principaux composants, un peu de théorie sur la puissance récupérée par une turbine et nous terminerons par une conclusion du chapitre.

Le second chapitre est consacré au gisement éolien et à la conversion de l'énergie Mécanique en énergie électrique d'une éolienne, pour cela nous allons citer les différents systèmes utilisés par les constructeurs sous différentes vitesses appliquées à celle-ci, ainsi que les différents montages afin qu'on puisse comprendre sans détail, la procédure de conversion.

Le troisième chapitre traitera une étude de cas, nous prendrons comme site d'étude le sud de l'Algérie plus exactement **la région de InSalah** on aura à étudier le comportement de la vitesse du vent face à la conversion électrique. Pour traiter ces deux parties nous avons deux logiciels (utilisés dans le domaine de l'éolien) le **Wasp** et le **WindFarmer** le premier sert à traiter les données du vent (mesurées au niveau d'une station de mesure météorologique), le deuxième nous calculera les puissances obtenues à la sortie de deux aérogénérateurs portant la même puissance et différent sur leur construction (vitesse variable et vitesse fixe).

La conclusion générale qui rappelle le but de notre travail, nos objectifs atteints. On résume le parcours de notre travail et enfin une recommandation sur les perspectives des travaux futurs.

1-1 introduction

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Les modes et les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines années. En effet, les modes de production reposant sur la transformation des énergies renouvelables (éolien, solaire, etc..), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable, les décideurs politiques des principaux pays industrialisés et des pays émergents ont favorisé la mise en place de nouveaux moyens de production de ces énergies plus propres et respectueuses de l'environnement. La solution est l'exploitation de ces énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place comme énergie complémentaire à l'énergie classique utilisée.

Ce chapitre présente les deux structures d'éoliennes existantes : éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable. Puis, les différentes génératrices associées à chacun de ces types, leurs stratégies de commande seront expliquées dans les différentes zones de fonctionnement.

1.2 Développement de l'énergie éolienne

1.2.1 Historique

La puissance du vent a été utilisée depuis de nombreux siècles, notamment pour faire avancer les bateaux, moulin le grain, et pour produire de l'électricité.

- **4000 ans avant J.-C** : L'homme apprend à maîtriser le vent, les Chinois sont, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune.
- **XV^e siècle** : Léonard de Vinci tente de voler
- **1783** : La première montgolfière transporte l'homme dans les airs, (énergie thermique pour l'élévation et énergie éolienne pour la direction)
- **1852**: Henri Giffard conçoit le premier dirigeable au monde.
- **1903**: Le premier vol mondial à bord d'un avion à moteur aux États-Unis. Les deux frères, Orville et Wilbur Wright, réussissent à voler pendant 40 mètres avant d'atterrir en toute sécurité.

- 1887-1888, Malgré sa grande taille de 17 mètres de hauteur, elle ne produisait que 12 KWh. l'américain Charles F. Brush construit à Cleveland la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité.
- 1891 Poul La Cour a eu l'idée d'associer à une turbine éolienne une génératrice, L'arrivée de l'électricité, les recherches allèrent bon train dans les années 1920.
- En effet, la popularité de l'énergie éolienne a toujours été en relation avec les prix des combustibles fossiles.
- 1945 après la seconde guerre mondiale, avec la baisse des prix des combustibles fossiles, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage.
- les années 1970 la crise du pétrole, relance la production d'énergie à grande échelle par les éoliennes.

Depuis les années 1990, le développement de l'électronique de puissance, les nouvelles connaissances, l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes et surtout les subventions accordées par de nombreux gouvernements ont rendu la solution éolienne plus compétitive. [1]

D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 GW de puissance installée. L'éolien pourrait couvrir jusqu'à 30 % des besoins électriques mondiaux en 2030 si la volonté politique soutient son développement à grande échelle. [2]

Les choix politiques des années qui viennent détermineront la situation écologique et économique mondiale pour de nombreuses décennies.

Le rapport annuel publié par le GWEC (Global Wind Energy Council) pour l'année 2014, montre l'énorme intérêt voué à l'énergie éolienne à travers le monde, en effet la puissance totale installée à travers le monde jusqu'à la fin de l'année 2014 est estimée à 369.6 GW contre 318.6 GW pour l'année précédente (**Figure 1.1**).

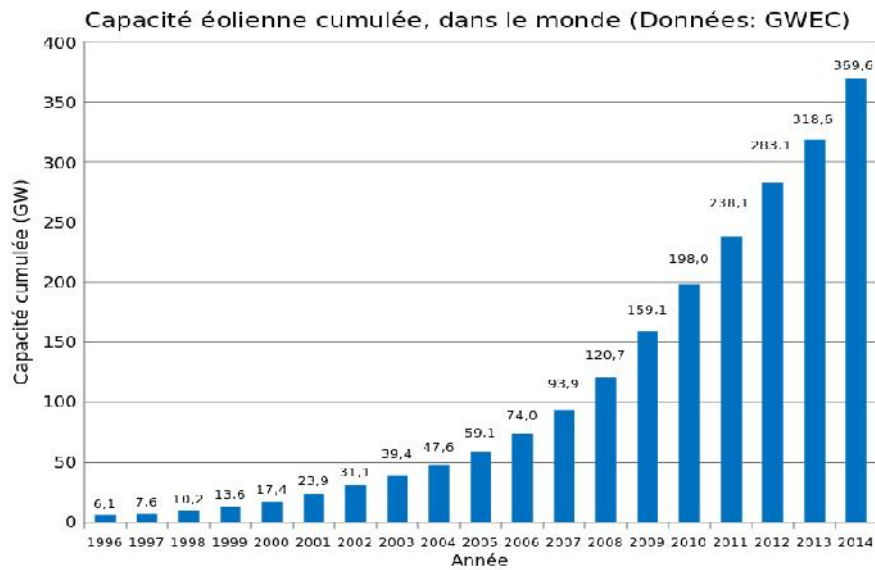


Figure 1.1 : croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1996 à 2014. [3]

1.2.2 Principaux producteurs d'énergie éolienne dans le monde: [4]

- **Iberdrola** annonce 17 355 MW de puissance installée terrestre, dont 5 735 MW en Espagne, 5 443 MW aux États-Unis, 1 267 MW au Royaume-Uni et 1 310 MW dans le reste du monde ; en offshore 6 110 MW en développement, dont 79.% au Royaume-Uni, 13 % en Allemagne et 8 % en France.[5]
- **NextEra Energy Resources** annonce plus de 10 000 MW sur 100 parcs éoliens dans 19 états des États-Unis et au Canada.[6]
- **Acciona** annonce 6 291 MW de puissance installée (plus 1 472 MW installés pour des clients), dont 4 073 MW en Espagne, et une part de marché de 3 % de la puissance installée dans le monde.[7]
- **Babcock & Brown** a fait faillite en 2009; sa liquidation est en cours de finalisation en 2013. [8]
- **EDF Énergies Nouvelles** annonce 5 525 MW de puissance installée, dont 1 767 MW aux États-Unis, 769 MW en France(+40 MW en construction), 432 MW au Royaume-Uni (+62 MW en construction), 548 MW en Italie, 496 MW au Portugal, 334 MW en Turquie (+170 MW en construction), 325 MW en Belgique, 316 MW en Grèce (+69 MW en construction), 255 MW au Canada (+775 MW en construction), 231,5 MW au Mexique (+160 MW en construction).[9]

- **ENEL**, qui annonce 3 573 MW dont 1 640 MW en Espagne, 623 MW en Italie, 605 MW en Amérique du Nord, 265 MW en Roumanie, 172 MW en Grèce, 166 MW en France et 102 MW en Amérique latine .[10]
 - **EDP** a regroupé ses activités dans les énergies renouvelables dans une filiale EDP Renewables qui annonce 3 637 MW installés aux États-Unis (plus 8 393 MW en projet), 2 310 MW installés en Espagne (plus 3 689 MW en projet), 1 005 MW au Portugal, 350 MW en Roumanie, 314 MW en France, et des parcs plus petits en Pologne, Belgique, Brésil, Italie, Royaume-Uni et au Canada.[11]
 - en Chine, la compagnie **China Power Investment Corporation**, un des cinq « Gencos » (producteurs d'électricité), annonce 3 186 MW d'éoliennes à fin 2012 (4 % de sa puissance installée totale).[12]
- une donnée de synthèse mondiale à la fin 2014 de la puissance installée éolienne atteignait 369,6 GW, en augmentation de 51,5 GW en un an (+16,2 %, contre +12,4 % en 2013). La Chine a installé à elle seule 23,35 GW, soit 2 % du total 2014 et représente 31% du parc mondial Fin2014, comme le montre le tableau ci-dessous.[13]

Rang (fin 2014) ↕	Pays ↕	1997 ↕	2000 ↕	2005 ↕	2010 ↕	2011 ↕	2012 ↕	2013 ↕	2014 ↕
01	 Chine	146	352	1 266	41 800	62 733	75 564	91 412	114 763
02	 États-Unis	1 673	2 564	9 149	40 200	46 919	60 007	61 110	65 879
03	 Allemagne	2 081	6 095	18 500	27 191	29 060	31 332	34 250	39 165
04	 Espagne	427	2 535	10 028	20 623	21 674	22 796	22 959	22 987
05	 Inde	940	1 267	4 430	13 065	15 800	18 421	20 150	22 465
06	 Royaume-Uni	319	409	1 353	5 204	6 540	8 445	10 711	12 440
07	 Canada	25	137	683	4 008	5 265	6 200	7 823	9 694
08	 France	10	60	757	5 970	6 800	7 196	8 243	9 205
09	 Italie	103	427	1 718	5 797	6 737	8 124	8 558	8 663
10	 Brésil ^{n 21}	3	22	29	931	1 509	2 508	3 466	5 939
11	 Suède	127	241	509	2 163	2 907	3 745	4 382	5 425
12	 Portugal	38	83	1 022	3 706	4 083	4 525	4 730	4 914
13	 Danemark	1 066	2 417	3 128	3 749	3 871	4 162	4 807	4 845
14	 Pologne	2	5	73	1 180	1 616	2 497	3 390	3 834
15	 Australie	4	30	579	2 020	2 224	2 584	3 239	3 806
16	 Turquie		19	201	1 329	1 799	2 312	2 958	3 763
17	 Roumanie		0	1	462	826	1 905	2 600	2 954
18	 Pays-Bas	319	440	1 224	2 269	2 328	2 391	2 671	2 805
19	 Japon	18	142	1 040	2 304	2 501	2 614	2 669	2 789
20	 Mexique							1 859	2 381
21	 Irlande	53	119	495	1 420	1 631	1 730	2 049	2 272
22	 Autriche							1 684	2 095
	Total mondial ^{33, 37, g 3}	7 482	18 040	59 135	194 680	237 502	282 398	318 596	369 553

Tableau 1-1: Puissance éolienne installée - évolution de 1997 à 2014.[13]

1.2.3 Etat de l'art sur la conversion électrique

1.3 Quelques notions sur le vent:

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques de vent sur le site de leur implantation. En effet, la vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons et même durant la journée. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones

anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec un appareil de mesure appelé **anémomètre**, il existe deux catégories principales: **anémomètre à rotation** et **anémomètre à pression**.

Selon l'échelle Beaufort, Une graduation a été établie qui divise les vents en fonction de leurs vitesses représentées sur le Tableau 1-2. [14]

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau 1-2 : **échelle Beaufort**

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger la capacité de production d'une centrale éolienne.

Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc, pour cela il faut connaître la vitesse moyenne du vent et sa variation en fonction de l'altitude. [14]

1.3.1. Caractéristiques du vent

Pour la production en site isolé mais également pour la gestion du réseau électrique lorsque les aérogénérateurs sont couplés au réseau, il est nécessaire de connaître les statistiques de vitesse du vent tout au long de l'année. Cela requiert une caractérisation préalable des sites sur au moins une année et une mise à jour continue des bases de données.

Ces caractéristiques sont données par :

- ❖ Variations saisonnières
- ❖ Variations diurnes
- ❖ La vitesse moyenne du vent
- ❖ Variations à l'échelle annuelle et mensuelle
- ❖ Fréquence de distribution de la vitesse du vent
- ❖ Rose des vents
- ❖ Puissance éolienne disponible

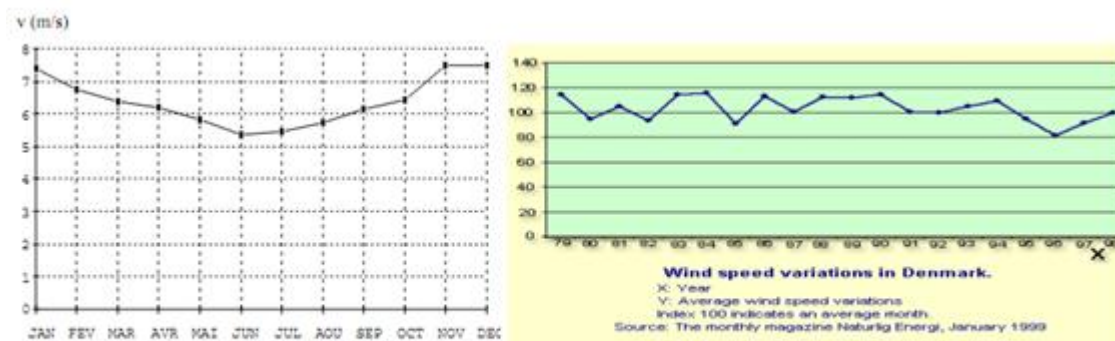
Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne doivent être adaptés aux caractéristiques du potentiel éolien de la zone de fonctionnement, Le potentiel éolien P est calculé en utilisant la formule suivante : [15]

$$P = 1/2 \rho V^3 \quad (1.1)$$

avec

P : en W/m^2

ρ : la densité de l'air.



a : Moyennes mensuelles

b : Moyennes annuelles

Figure 1.2 Evolutions de la vitesse du vent

La figure 1. 3a donne la répartition annuelle des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée [16]. Comme la plupart des éoliennes démarrent à une vitesse de vent supérieure à 3 m/s, on remarque, sur cette figure, que l'exploitation de l'énergie éolienne est favorable pour le site, car les moyennes mensuelles du vent restent supérieures à 5m/s. On peut également observer des variations selon les années, la figure 1.3b montre de telles évolutions sur 20 ans. [17]

1.3.2. La hauteur de la couche limite atmosphérique(CLA)

Située entre le sol et l'atmosphère libre, la couche limite atmosphérique est composée de **trois couches distinctes** d'épaisseur variable, à savoir la **sous-couche rugueuse** (de quelques millimètres à quelques mètres), la **couche de surface** (quelques dizaines à la centaine de mètres), et la **couche d'Ekman** (de l'ordre du kilomètre).

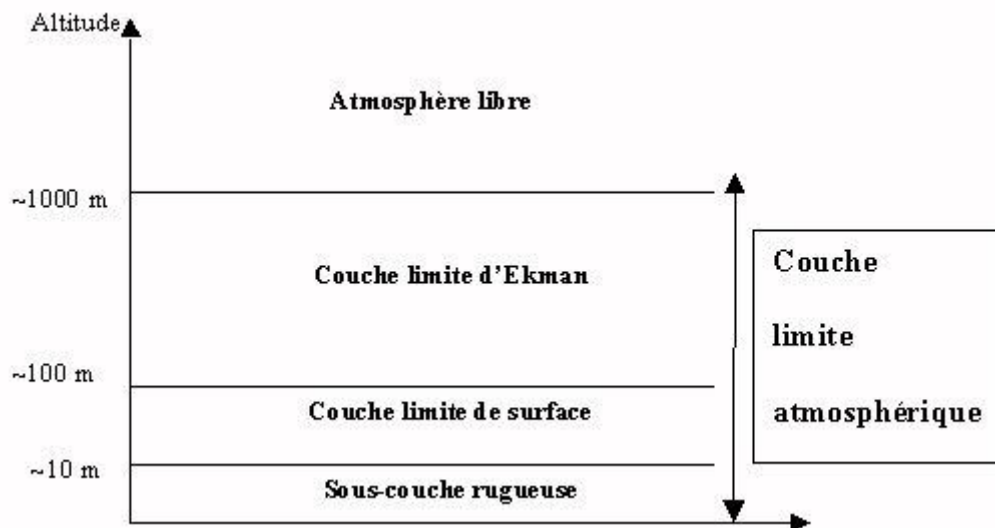


Figure 1.3 répartition des couches atmosphériques

- **La sous-couche rugueuse**

Elle se trouve au voisinage immédiat du sol. C'est une zone de mélange des sillages des obstacles rencontrés par le vent. Les champs de vitesses y est fortement hétérogènes et instationnaires et les froces de frottement y sont prépondérantes.

Son épaisseur varie en fonction de la nature du terrain, **de quelques millimètres en mer à quelques dizaines de mètres** en zone urbaine. C'est au travers de cette couche que se font les échanges de masse, d'énergie, et d'humidité entre le sol et la couche limite atmosphérique.

- **La couche limite de surface**

Communément appelée CLS et également appelée couche de mélange ou couche de Prandtl, elle est définie comme la région où la température diminue rapidement avec l'altitude pendant la journée, et où les flux de quantité de mouvement, de chaleur sensible et latente sont conservatifs et égaux à ceux du sol.

Elle s'étend de **dix à quelques dizaines de mètres** et représente environ 10% de la couche limite atmosphérique. La turbulence y est homogène, et la force de Coriolis négligeable devant les forces de frottement dues au sol. Enfin, la direction du vent (composante horizontale de la vitesse) ne varie pas avec la hauteur alors que son intensité est proportionnelle au logarithme de l'altitude.

- **La couche d'Ekman.**

C'est une couche de mélange où la force de Coriolis devient comparable aux forces de frottement au sol. Cela entraîne une rotation de la direction du vent avec l'altitude pouvant atteindre 30 à 40°. Celle-ci se fait dans le sens anticyclonique(à droite pour l'hémisphère Nord et à gauche pour l'hémisphère Sud)[18]

1.4 L'Aérogénérateur

Un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique est appelé **aérogénérateur** tandis qu'une éolienne, est utilisée pour différent domaine (pour pomper l'eau et moudre le blé etc..).

1.5 types d'Aérogénérateurs

Les Aérogénérateurs se divisent en deux grandes familles : les Aérogénérateurs à axe vertical qui tendent à disparaître, les Aérogénérateurs à axe horizontal.

1.5.1 Aérogénérateur à Axe Vertical

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et est perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation.

Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique, comme le montre la figure 1.5 avec ses différentes technologies.

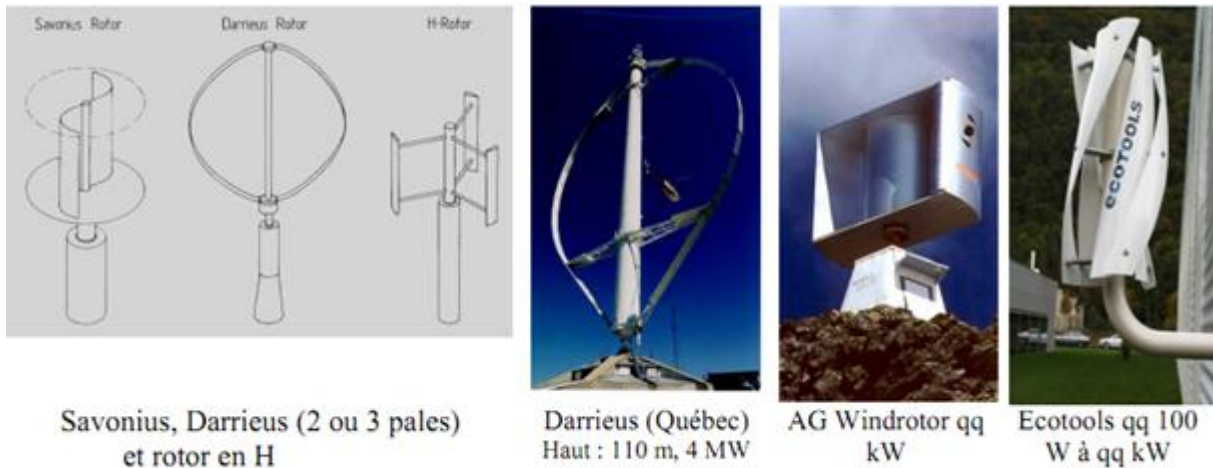


Figure 1.4 technologies d'éoliennes à axe vertical

1.5.1.1 Aérogénérateurs à Rotor de Darrieus

Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Voir figure 1.7

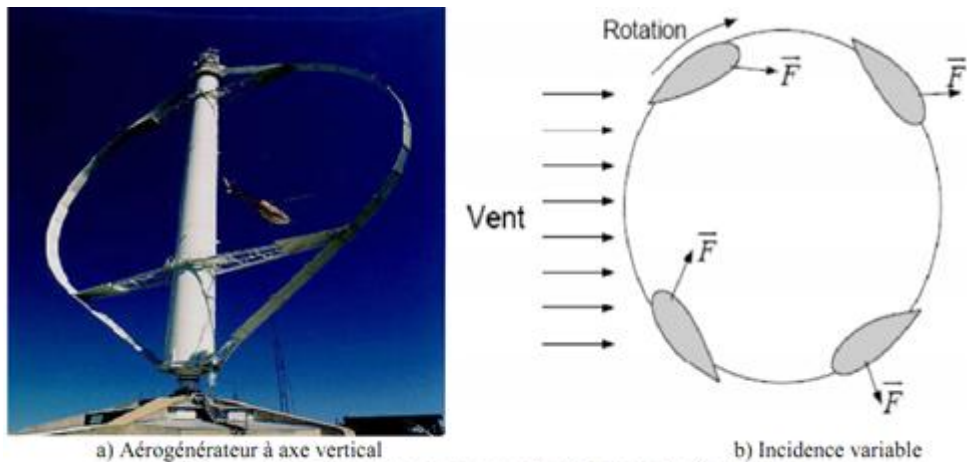
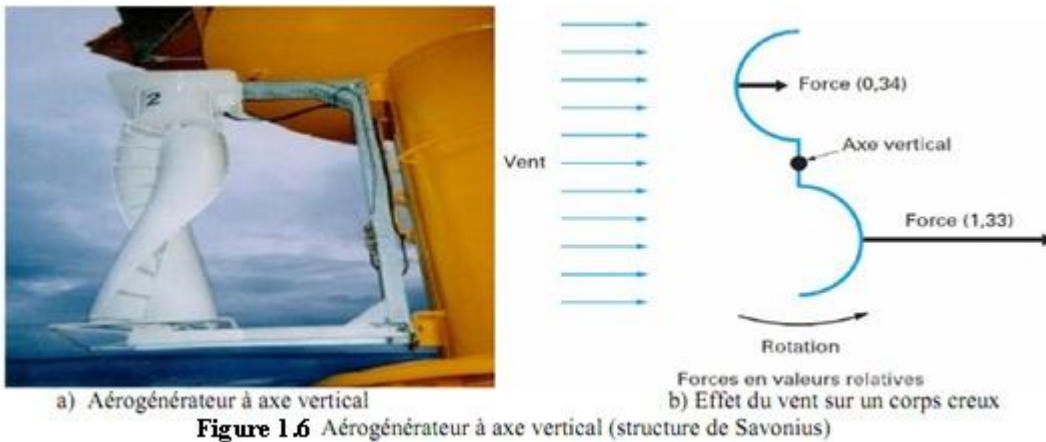


Figure 1.5 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)

1.5.1.2 Aérogénérateurs à Rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Fig. 1.12.a). Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables générant ainsi un couple moteur (Fig. 12.b). Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le

Français Darrieus. Les rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique, etc. [19]



1.5.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales [20], mais il existe d'autres structures à une ou deux pales. Voir Figure 1.9 [21]



Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.

1.6 Principales composantes des aérogénérateurs à axe horizontal

Comme l'aérogénérateur à axe horizontal est le plus utilisé, on s'intéresse à la structure interne de cet aérogénérateur. Les trois principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal sont : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu .

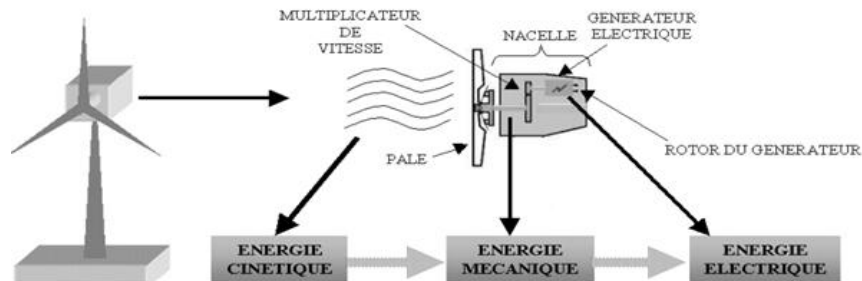


Figure 1.8 : principe de conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur est constitué de plusieurs éléments tels représentés sur la (figure 1.9) mécanique à disques (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile. La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent.

Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent. [22]

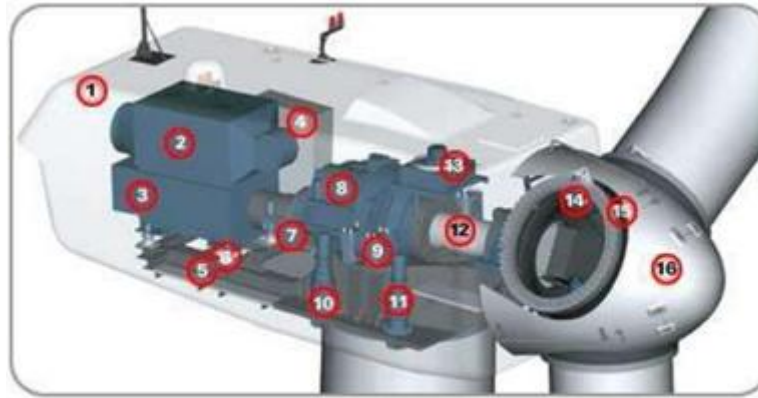


Figure 1.9 : éléments constituant d'une éolienne

1.7 Puissance récupérable par une turbine

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.2)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_V = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (1.3)$$

où ρ est la masse volumique de l'air.

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance P_e inférieure à la puissance incidente P_V , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur .[23]

On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

$$C_p = \frac{P_e}{P_V} ; \quad C_p < 1 \quad (1.4)$$

Ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne.

La puissance correspondante est donc donnée par:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (1.5)$$

Où R est le rayon de l'hélice.

On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie Rankine-Froude de l'hélice dans un fluide incompressible. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance [24] :

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (1.6)$$

Avec ;

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (1.7)$$

où $R\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

La courbe $C_p(\lambda)$ passe un maximum λ_{max} , compris entre 5 et 16 environ, selon le nombre de pales de la turbine et c'est seulement pour cette valeur que C_p approche la valeur de 16/27.

On peut définir la notion de rendement aérodynamique de l'éolienne par le rapport :

$$r_{ia} = \frac{C_p}{C_{pmax}} = \frac{C_p}{0.593} \quad (1.8)$$

qui est représentatif de la « qualité aérodynamique » de l'éolienne.

La figure 1.10 montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales [25], notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Ces courbes dépendent pratiquement du profil des pales.

Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour $\lambda \approx 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale.

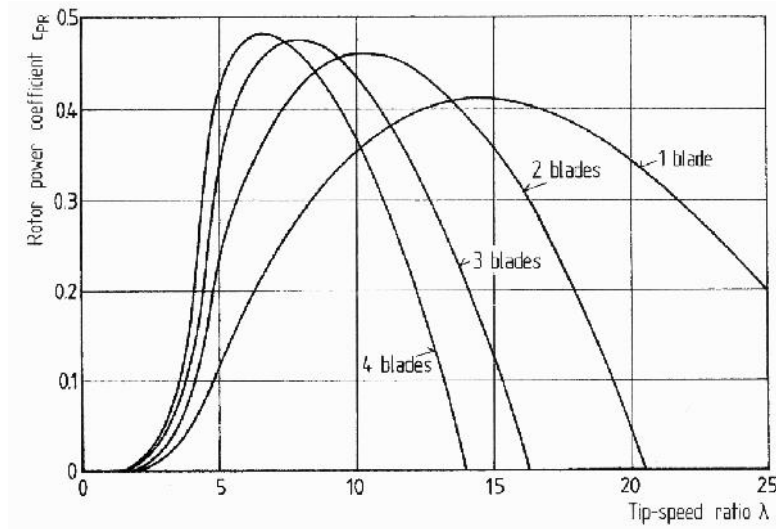


Figure 1.10 Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ

Un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, permet de rester sur le maximum de la courbe. Pratiquement la puissance récupérable ne dépasse pas 60 à 70% de la valeur maximale (0,59) à cause des divers rendements successifs de la chaîne de conversion.

1.8 Régulation mécanique de la puissance d'un aérogénérateur

la régulation assure la sécurité d'un aérogénérateur par vents forts et delimitier la puissance.

Une turbine d'un aérogénérateur est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance P_n . La puissance P_n dénommée puissance nominale est obtenue à partir d'une vitesse du vent v_n (vitesse nominale). Lorsque la vitesse du vent est supérieure à v_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

on spécifie aussi : [26]

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

Les vitesses v_D , v_n et v_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

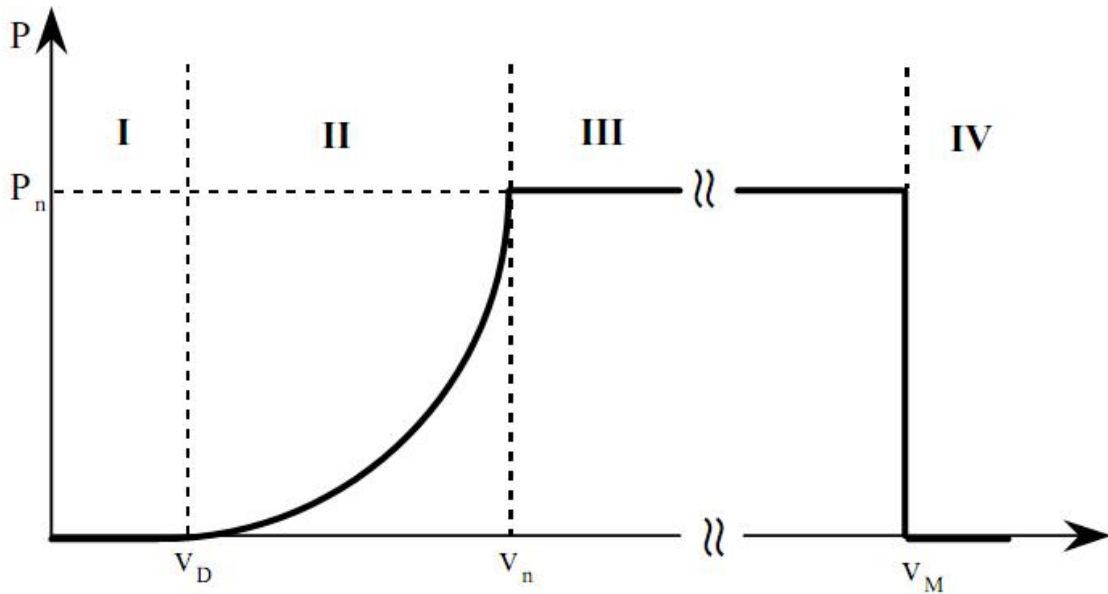


Figure 1.11 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

- la zone I, où $P = 0$ (en arrêt),
- la zone II, la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v ,
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie = P_n ,
- la zone IV, le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

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

- système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses ;

- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive. Dans les très grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif » dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch.

La figure 1.13 montre les écoulements d'air dans une situation « normale » et dans une situation de décrochage.

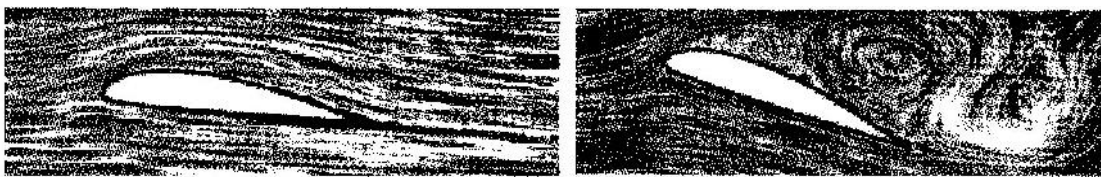


Figure 1.12 Écoulement d'air sur une pale en régime « normal » (à gauche) et en situation de décrochage (à droite)

1.9 Avantages et Inconvénient des Machines à Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontales sont actuellement les machines les plus répandues étant donné leur rendement supérieur à celui de tout autre type d'aérogénérateur avec des frais de fonctionnement relativement faibles. Le rendement élevé dû à un équipement fonctionnel qui leur permet de s'orienter selon la direction du vent et de capter ainsi toute son énergie. Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques que celles à axe vertical. Elles sont mieux adaptées au secteur rural. Elles sont plus solides. Mais elles présentent quelques inconvénients, tels que la nécessité plus de plus de maintenance dans la mesure où elles sont moins résistantes aux vents forts que les éoliennes à axe vertical. En effet, un système de régulation est requis pour éviter une vitesse trop élevée de l'hélice. Elles sont moins simples que les éoliennes à axe vertical, et les pales du rotor ne doivent pas être flexibles. Aussi, elles font beaucoup de bruit.[27]

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne comme : le principe de fonctionnement d'un aérogénérateur (à vitesse fixe ou à vitesse variable), les différents types d'éoliennes (axe horizontal ou axe vertical), le mode de fonctionnement pour les machines à axe horizontal (système d'orientation des pales ou système à décrochage aérodynamique), quelques notions sur le vent et la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Chapitre 2 : Energie éolienne et conversion électrique

2.1 Introduction

Pour pouvoir mesurer la puissance électrique à la sortie de la génératrice éolienne, il faut d'abord connaître le comportement de la vitesse du vent au niveau du rotor éolien, ensuite la conversion.

Ce chapitre, traitera en premier lieu le gisement éolien puis la conversion de l'énergie électrique, Pour cela Il existe différents types de machines électriques qui peuvent être utilisés pour la génération de puissance électrique éolienne, Celles ci peuvent être reliées directement ou indirectement au réseau électrique.

2.2 Gisement éolien.

2.2.1 Modélisation Mathématique De La Distribution Des Fréquences Du Vent

L'analyse fréquentielle de la vitesse du vent met en évidence les classes de vitesse prédominantes. Par conséquent, et en fonction des caractéristiques des éoliennes disponibles sur le marché, on peut choisir celles qui fournissent le meilleur rendement.

En disposant d'un ensemble N valeurs mesurées de la vitesse du vent on détermine l'histogramme de la vitesse du vent (la courbe de distribution des vitesses du vent figure 2.1).

Sur la figure 1.4 les fréquences sont cumulées :

$F_1 = f_1$ pour l'intervalle $[0, \Delta v]$,

$F_2 = f_1 + f_2$ pour l'intervalle $[0, 2\Delta v]$, etc.

On a adopté $\Delta v = 1\text{m/s}$.

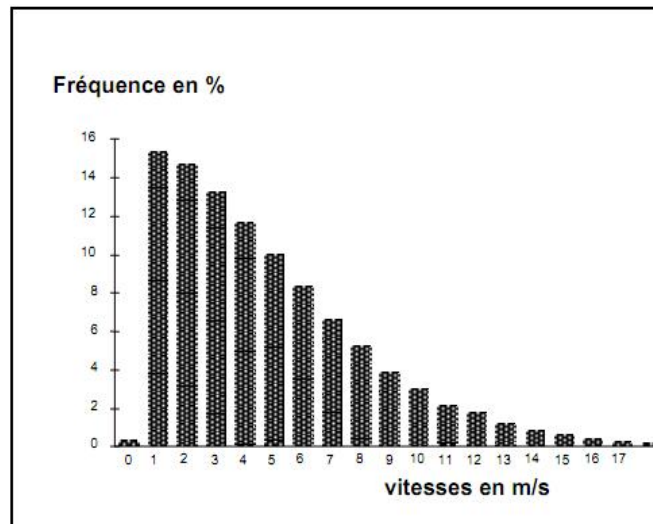


Figure 2.1 Courbe de distribution des vitesses du vent

Si $N \rightarrow \infty$ et $\Delta v \rightarrow dv$, la fréquence f_i et la fréquence cumulée F_i tendent, respectivement, vers la fonction de densité de probabilité $f(v)$ et vers la fonction de répartition $F(v)$.

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de $F(v)$:

$$f(V) = \frac{dF(V)}{dV} \quad (2.1)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent [28].

La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit :

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2.2)$$

En utilisant la relation (1), il résulte la fonction de la densité de probabilité $f(v)$:

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (2.3)$$

avec :

- k paramètre de forme caractérise la répartition du vent,
- c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie trouve dans les hautes vitesses)
- V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

La plupart des sites éoliens ayant une vitesse de vent qui respecte la distribution de Weibull [29] avec un paramètre de forme $k=2$, on définit la distribution de **Rayleigh** (Weibull avec $k = 2$) qui est plus simple à manipuler :

$$h = 2\lambda^2 \cdot V \cdot e^{(-\lambda V)^2} \quad (2.4)$$

La vitesse moyenne annuelle divisée par le nombre d'heures total annuel (8760h/an) peut être définie de la façon suivante :

$$V_{moy} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} f(V) \cdot dV \quad (2.5)$$

La vitesse moyenne dans ce modèle, vaut: $V_{moy} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ | (2.6)

La fonction Γ est définie par : $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) \cdot t^{x-1} dt$ (2.7)

Avec le modèle de Rayleigh, on a très simplement: $V_{moy} = 0,9 \cdot C$

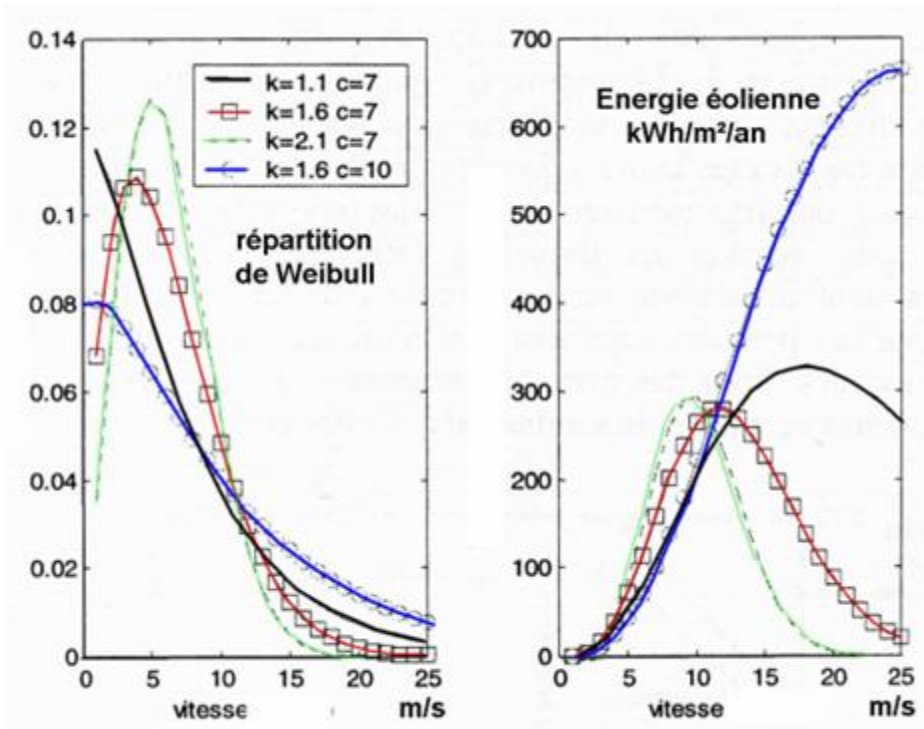


Figure 2.2

Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution [30]

2.3 Conversion de l'énergie

2.3.1 Installation en mode autonome

Le fonctionnement en mode autonome d'un aérogénérateur alimente des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appui. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt significatif en cas d'absence de groupes électrogènes, notamment en cas de vent faible. Le recours à des batteries est utile pour le stockage d'énergie à long terme. D'autres systèmes de stockage sont envisagés comme le stockage inertiel à court terme.

Le stockage inertiel évite alors l'utilisation de batteries qui présentent un caractère polluant pour l'environnement. L'énergie se présente sous forme d'énergie cinétique, stockée dans un volant d'inertie. La génératrice utilisée peut être une machine synchrone à aimants permanents ou une machine asynchrone à cage munie de capacités indispensables pour son excitation. [31]

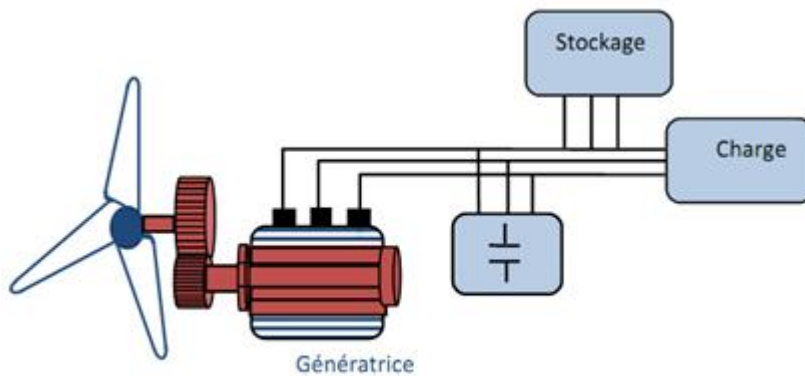


Figure 2.1 Eolienne fonctionne en mode autonome

2.3.2 Installation réseau

Les aérogénérateurs connectés au réseau peuvent être aussi classés selon leur vitesse de rotation. Celles-ci peuvent être fixes ou variables.

2.3.2.1 Fonctionnement des aérogénérateurs à vitesse fixe

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas).

Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles.

Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit. [32]

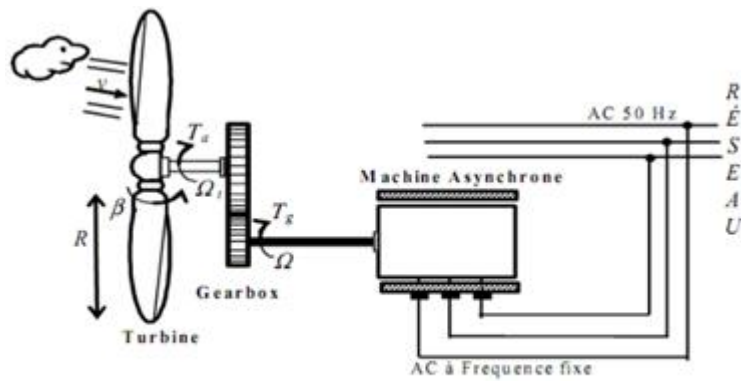


Figure 2.2 *Aérogénérateur à vitesse fixe*

2.3.1.1 Machine asynchrone à cage:

Les machines asynchrone à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé [33], elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi connues par leur sécurité de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues. Grâce à ces avantages, les générateurs asynchrones à cage sont les plus populaires dans l'industrie des générateurs éoliens à vitesse fixe. Environ de 85% de ces applications (à vitesse fixe) sont donc à connexion directe sur le réseau électrique.

Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible [34].

Mais dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le problème majeur de ces solutions est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. De plus, les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations. La machine consomme de la puissance réactive pour magnétiser son rotor et détériore ainsi son facteur de puissance.

Pour contrer cette imperfection, on utilise des condensateurs que l'on introduit en parallèle au dispositif comme le montre la figure ci-dessous suivante. Ils deviennent alors la seule source de puissance réactive.

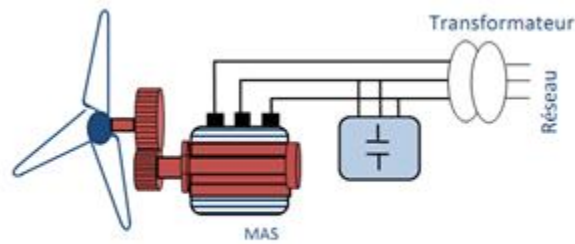


Figure2.3 Schéma de la connexion directe au réseau de l'éolienne avec la machine asynchrone à cage

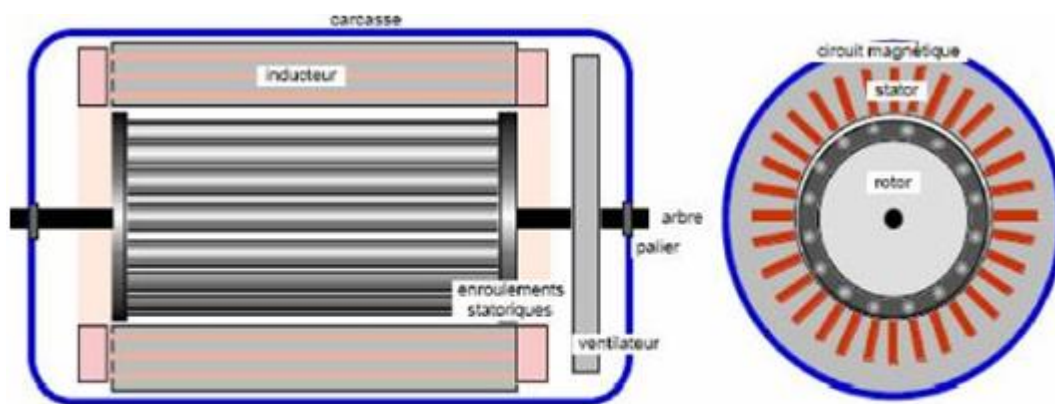


Figure2.4 : Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Pour connecter l'éolienne au réseau dans cette configuration, on procède en deux temps: le premier temps consiste à connecter les enroulements statoriques au réseau par l'intermédiaire de résistances afin de limiter les courants statoriques transitoires.

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator.

VESTAS ; VERGNET, SUZLON ou encore MITSUBISHI.

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des MAS à cage d'écureuil peuvent se résumer alors dans les points suivants [35]:

- ❖ Système électrique simple.
- ❖ Grande fiabilité.
- ❖ Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ❖ Une puissance extraite non optimale: Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ❖ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone: La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

2.3.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator

certain constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator, Pour améliorer le rendement du dispositif (Figure 1.21) :

- ✓ Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- ✓ Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [35].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées.

La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

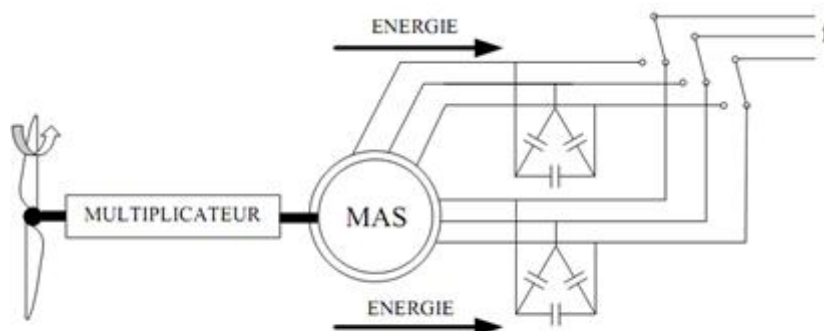


Figure 2.5 : Machine asynchrone à double stator

2.3.2 Fonctionnements sous vitesse variable

L'importance du fonctionnement à vitesse variable et la nécessité du réglage continu de celle-ci afin de maintenir le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale, surtout si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau. En effet, dans ce cas, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse du vent (λ_{opt}).

Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse électroniquement variable apporte beaucoup plus en terme énergétique.

La figure (2.6) montre que la position du maximum de la courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de la vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [36].

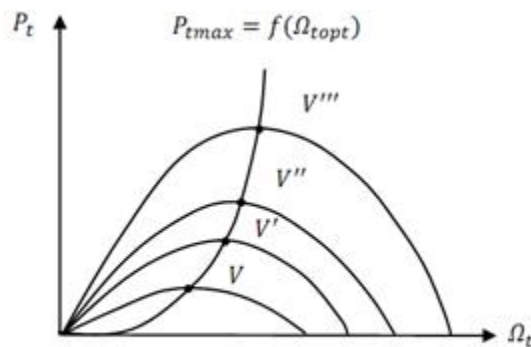


Figure 2.6 Variation de la puissance éolienne maximale en fonction de la vitesse du vent.

2.3.2.1 Système Utilisant Une Génératrice Synchrone

les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles) [37]. Dans ce cas, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement [38].

Les éoliennes basées sur une **génératrice synchrone à rotor bobiné** sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé à travers l'onduleur souvent à **MLI**. Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles [33]. Le développement **des aimants permanents** en terres rares permet de s'affranchir de ces inconvénients et de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables .[38]

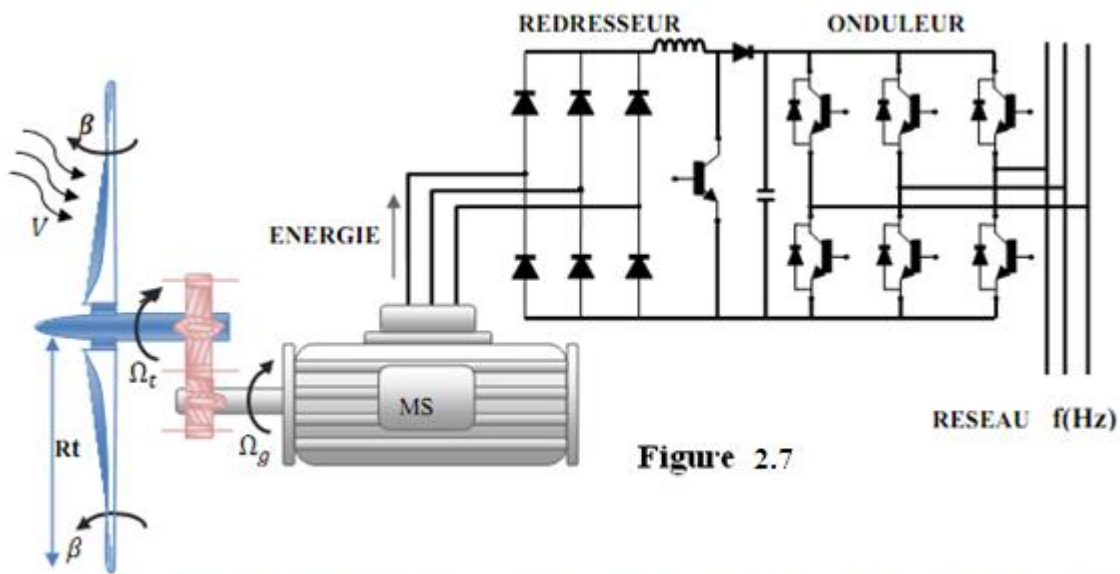


Figure 2.7 Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (**Figure 2.7**).

Dans ce cas, l'interface avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [33].

Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration.

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking 'MPPT') [39].

2.3.2.2 Système Utilisant une génératrice Asynchrone

Une génératrice asynchrone est une machine asynchrone dont le rotor est entraîné à une vitesse supérieure à celle de synchronisme. En raison de la consommation de puissance réactive, ce type de générateur ne peut pas fonctionner indépendamment d'un réseau qui doit lui fournir la puissance réactive nécessaire. Dans le cas d'un site isolé, on doit utiliser des batteries de condensateurs ou des compensateurs actifs pour produire la puissance réactive demandée.

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation (MADA) présente un atout considérable. Elle présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et

l'énergie rotorique varie selon différents systèmes. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur. [40]

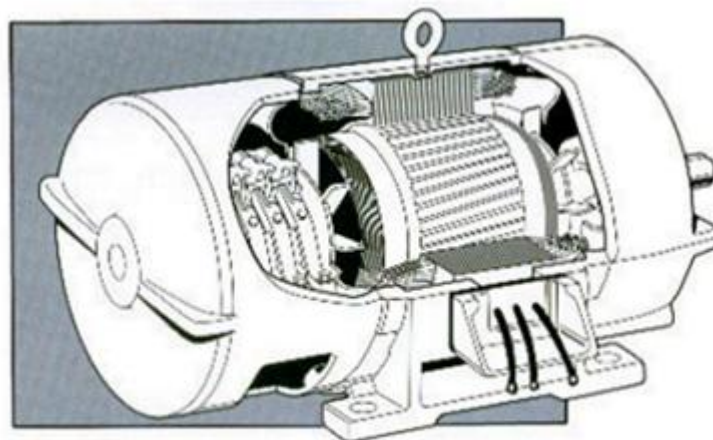


Figure2.8 : Machine asynchrone à rotor bobiné

2.4 Convertisseurs de Fréquence

Le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes est devenu possible, grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. Ces convertisseurs sont utilisés pour adapter la fréquence variable du générateur à la fréquence du réseau tout en assurant un rendement élevé. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. Ces dispositifs sont des convertisseurs de puissance bidirectionnels. Le facteur de puissance côté réseau est contrôlé. Le fonctionnement de ce dispositif est réversible en courant. Le redresseur devient onduleur et l'onduleur redresseur. Les deux convertisseurs ont la possibilité de contrôler cette puissance réactive grâce à la production ou l'absorption de la puissance réactive du rotor. Ainsi, le contrôle de la variation de la vitesse de générateur permet de limiter le système d'orientation des pales à une fonction de sécurité par grand vent ; de même qu'une commande adéquate permet de délivrer des courants de fréquence fixe correspondant à celle du réseau, avec la possibilité de la compensation des courants harmoniques. On utilise les transistors IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) comme interrupteurs. Ils peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des thyristors GTO. On utilise un redresseur à diodes pour les machines synchrones, leur fonctionnement est unidirectionnel.

Le redresseur à MLI est utilisé pour les machines asynchrones. Le redresseur MLI permet par ailleurs de fournir la puissance réactive magnétisante. [41]

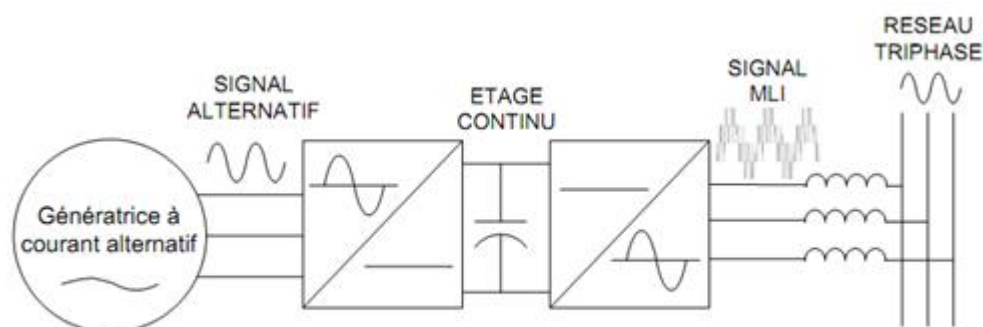


Figure2.9 : interface d'électronique de puissance

2.5 Caractéristiques des différentes éoliennes.

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe Machine asynchrone à cage d'écureuil.	<ul style="list-style-type: none"> . Machine robuste . Faible coût . Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> . Puissance extraite non optimisée . Maintenance boîte de vitesse . Pas de contrôle de l'énergie réactive . Magnétisation de la machine imposée par le réseau
MADA Vitesse Variable Machine asynchrone à double alimentation	<ul style="list-style-type: none"> . Fonctionnement à vitesse variable . Puissance extraite optimisée . Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale . Machine standard . Connexion de la machine plus facile à gérer . Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> . Maintenance boîte de vitesse . Prix de l'électronique de puissance. . Contrôle – commande complexe . Contact glissant bagues - balais
MSAP Vitesse Variable Machine synchrone à aimant permanent	<ul style="list-style-type: none"> . Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse . Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. . Connexion de la machine facile à gérer . Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> . Prix de l'électronique de puissance . Machine spécifique . Grand diamètre de machine . Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

Tableau 2.1 Avantages et inconvénients des deux différents aérogénérateurs. [42]

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le gisement éolien , en utilisant les formules mathématiques de weibull pour la modélisation de la distribution de la vitesse du vent suivit de la conversion électrique .

dans la conversion électrique nous avons citer différents systèmes utilisés dans les aérogénérateurs (synchrone et asynchrone) pour les deux sortes de vitesse(vitesse fixe et variable) avec des montages les plus utilisés sur différents sites éoliens ,on a touché un peu à l'électronique de puissance pour comprendre comment on peut avoir une tension et une fréquence fixes à la sortie du générateur et un tableau comparatif qui nous donne les avantages et inconvénients des deux aérogénérateurs.

Chapitre 3 : Etude de Cas

3.1 Introduction

Dans ce chapitre il y'aura deux parties à étudier la première traitera le gisement éolien et la seconde la conversion électrique. pour cela, on utilisera deux logiciels, le Wasp et WindFarmer . le premier étudiera le gisement éolien et le second la conversion électrique.

Les données de vent utilisées proviennent de la station d'In Salah de l'ONM.pour l'application on choisira deux générateurs de même puissance nominale de 2MW, un à vitesse variable de type Generic et l'autre à vitesse fixe de type VESTAS V80, existants dans la bibliothèque de données du windfarmer.

3.2 Présentation des logiciels.

Il existe plusieurs logiciels utilisés dans le domaine de l'éolien nous citerons:

- **Aria Wind** : Calcul et optimisation de site éolien
- **Heliciel** : Calcul des hélices et éoliennes : calcul du vrillage des pales et modélisation 3D édition des plans de pales
- **HOMER** : Dimensionnement et calculs financiers pour systèmes hybrides
- **MAESTRO Wind** : Calcul du gisement et du productible éolien, optimisation de parc éolien
- **Meteodyn WT** : Logiciel CFD de calcul du vent, de la ressource éolienne pour un rendement optimal des parcs éoliens
- **Quantum GIS** : Logiciel de SIG open-source et multi-plateforme
- **RETScreen** : Analyse de projets d'énergies propres
- **WAsP** : Prévision des régimes de vent, de la ressource éolienne et de la production énergétique des éoliennes et des parcs éoliens
- **WindFarmer** : Logiciel utilisé pour calculer l'impact des éoliennes, le rendement énergétique, la viabilité d'un site éolien
- **Windographer** : Analyse des données du vent
- **WindPro** : Modélisation de parcs éoliens

3.2.1 Le logiciel Wasp (Wind Analysis and application Program)

Le logiciel WasP est un « standard » du marché avec plus de 800 utilisateurs, essentiellement en Europe. Il existe depuis 1986 et a fait l'objet de plusieurs mises à jour. Il fonctionne dans des terrains « non complexes », c'est-à-dire dans des zones où les pentes sont inférieures à 30% .

Ce logiciel permet le calcul, en tout point de la carte, de la vitesse moyenne du vent par direction et de la densité d'énergie. Le logiciel WasP nécessite des données météorologiques ainsi que des données de relief et rugosité.

Wasp est constitué de plusieurs modules, à savoir :

- ✓ **WAsP CFD** : approche fondamentalement nouvelle pour Computational Fluid Dynamics (CFD) pour l'évaluation de la ressource éolienne en terrain complexe.
- ✓ **WAsP Engineering (WEng)** : estimation de la vitesse extrême du vent, le cisaillement du vent, des angles d'inclinaison de l'écoulement, profils de vent et de la turbulence en terrain peu complexe.
- ✓ **Windfarm Assessment Tool (WAT)** : WAT facilite l'évaluation de parc éolien basée sur une combinaison des résultats Weng et de guêpes. Des fonctionnalités supplémentaires sont: la turbulence de sillage, le soutien à la gestion du secteur du vent et la nécessité de calibration du site avant les mesures in situ puissance-performances.
- ✓ **Fuga** : nouveau modèle de sillage pour l'estimation large de la ressource éolienne. Il est mis en œuvre comme un programme Windows avec une interface utilisateur graphique.
- ✓ **WAsPDownscaling** : réduction d'échelle pour la généralisation des données à méso-échelle WRF aux fichiers vent atlas WASP (* .lib), qui peut ensuite être appliquée dans WASP (et WindPRO et WindFarmer) pour les calculs microscopique des ressources éoliennes.

3.2.2 WindFarmer

Développé pour faciliter la conception de parcs éoliens et maximiser la puissance produite, tout en minimisant l'impact environnemental. Ses utilisateurs ont l'avantage concurrentiel et la précision de plus de 26 ans de savoir-faire.

WindFarmer importe des fichiers de données des ressources éoliennes à partir d'une large gamme de modèles de flux, y compris le nouveau WAsP CFD. En terrain complexe, le terrain boisé ou sur les sites où la stabilité atmosphérique est importante, le résultat peut être une amélioration significative sur les approches classiques

Windfarmer est constitué de plusieurs modules, à savoir :

- ✓ **Energie** ; cœur de WindFarmer. Avec les capacités fondamentales nécessaires à la conception professionnelle du parc éolien. Les principales caractéristiques sont un calcul de rendement, calcul d'énergie, analyse de l'incertitude, la modélisation du bruit, des fonctions de cartographie.
- ✓ **Visualisation** ; Le module de visualisation nous permet de modéliser et de démontrer l'impact visuel de votre parc éolien avant qu'il ne soit construit. Il comprend l'analyse des zones d'influence visuelle, une représentation virtuelle .
- ✓ **MCP** ; fournit tous les outils pour l'évaluation de données de vent mesurées. Les séries chronologiques de données peuvent être importées corrigées, tracées, documentées et ensuite corrélées aux données à long terme des ressources éoliennes.
- ✓ **Turbulence** ; fournit à l'utilisateur une modélisation de l'écoulement du vent sophistiquée qui permet un calcul plus précis de la performance de la turbine dans un parc éolien.
- ✓ **Finance** ; conçu pour permettre à l'utilisateur d'intégrer des évaluations financières complètes de projets d'énergie éolienne dans la phase de conception du projet. Les utilisateurs peuvent importer leur propre modèle financier ou utiliser le modèle financier inclus dans le forfait.
- ✓ **Electrique** ; permet de concevoir le schéma électrique d'un parc éolien.
- ✓ **Ombrage** ; calcule l'apparition de scintillement de l'ombre à un récepteur ou sous la forme d'une carte pour éolienne plan de la ferme et de la topographie. Les turbines provoquant intervalles de scintillement et de temps ombre d'occurrence peuvent être identifiés.

Son editeur **DNV-GL** de la Norvège le logiciel existe en version 5.3 sous deux systemes d'exploitation Windows XP , Vista et 7

3.3 Simulation et résultats.

3.3.1 Gisement éolien.

La première étape du travail consiste en l'analyse des données brutes de la vitesse du vent mesurées par l'O.N.M pour la station d'In Salah. Ces données sont présentées sous forme de tableau [voir annexe], regroupant une série de mesures tri-horaires de direction et de vitesse de vent recueillies sur une période de (2) années consécutives de mesures 2012-2013.

Observed Wind Climate (Wasp)

Site: 'In Salah – données ONM 2012-2013';

Position: 27,14°N 2,30°E;

Hauteur Anémomètre: 10,00 m.

Paramètre	Mesurée	emergent	difference
Vitesse moyenne [m/s]	-	5,88	unknown
Densité moyenne de puissance [W/m ²]	-	230 W/m ²	unknown

En utilisant l'utilitaire Observed Wind Climate, 'OWC', le module prend en considération les caractéristiques de la station, à savoir la hauteur du mât (10 m), les coordonnées du lieu de mesure (longitude 2.30°, latitude: 27.14°) et les données brutes de vent. Il opère alors un calcul statistique pour estimer la distribution des fréquences des vitesses, la densité de puissance et les paramètres de Weibull A et K.

On utilise les données de vent de la station d'In Salah, récupérées auprès de l'ONM sous format de fichier (.TXT), avec l'outil OWC.

Le traitement statistique suivant la distribution de Weibull (voir chapitre equation 2.3) a été effectué. La rose des vents est représentée sur la figure 3.1. Et les résultats de l'étude statistique de la vitesse sont représentés sur la figure 3.2 .

D'après la figure 3.1, on Remarque une prédominance des vents dans la direction Nord-Est.

La figure 3.2, nos donne une vitesse moyenne de 5.88 m/s avec un facteur d'échelle A de 6,7 m/s et un facteur de forme K de 2.17.

On Remarque que la fréquence des vitesses supérieures à 1 m/s est autour de 18%.

Le tableau 3.1 distribution de weibull nous montre que la contribution des vents prédomine dans la direction Nord-Est.

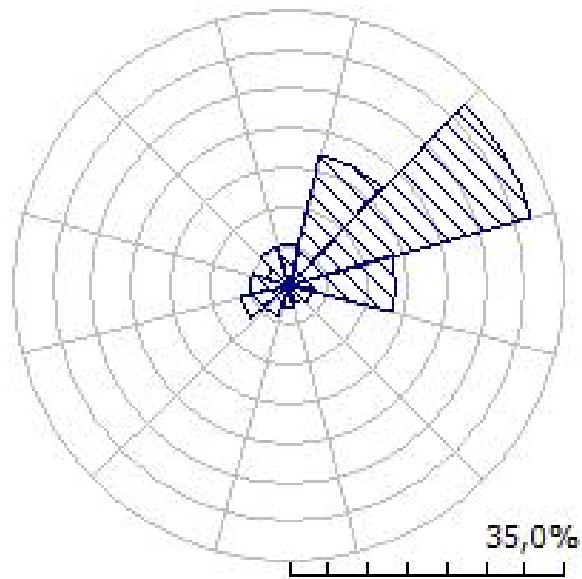


Figure 3.1 la rose des vents

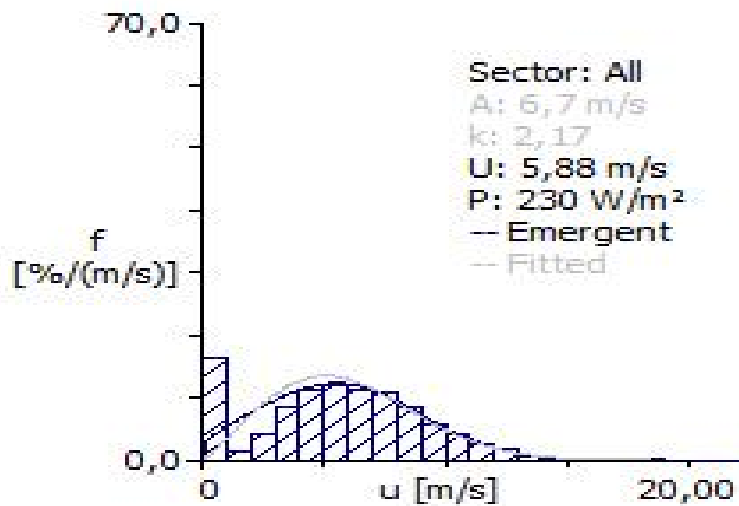


Figure 3.2 distribution de weibull

Tableau 3.1 données statistiques du vent par secteurs de direction

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A	5,2	7,1	8,2	7,6	4,1	2,1	2,8	5,2	5,7	5,1	3,5	4,8
k	2,01	3,02	2,82	2,41	1,46	0,97	1,12	1,56	1,83	1,75	1,36	2,03
U	4,57	6,32	7,30	6,70	3,73	2,14	2,65	4,63	5,10	4,52	3,19	4,27
P	111	216	347	299	91	39	53	156	171	125	63	90
f	5,4	17,1	32,1	13,5	3,2	2,2	2,5	4,0	6,4	4,9	3,2	5,3

U	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	All
1,0	250	79	42	100	417	603	533	337	210	276	422	254	162
2,0	17	7	9	14	11	23	27	13	12	24	43	27	14
3,0	66	35	27	42	56	61	61	38	45	59	88	74	43
4,0	121	76	50	76	111	96	105	103	120	123	107	136	83
5,0	145	116	86	103	122	88	112	124	155	151	123	173	113
6,0	142	142	121	112	98	50	61	98	133	116	88	141	120
7,0	112	151	136	105	69	31	27	81	96	88	51	88	113
8,0	68	158	146	121	45	19	24	60	59	57	35	51	109
9,0	31	120	118	112	26	11	24	51	43	31	13	26	85
10,0	24	59	88	75	16	11	14	38	45	28	8	13	58
11,0	16	28	74	55	13	8	10	21	40	22	13	10	43
12,0	2	14	49	32	8	0	3	13	23	10	8	5	26
13,0	3	8	31	25	3	0	0	11	15	7	0	3	17
14,0	3	2	14	16	3	0	0	2	3	5	0	2	8
15,0	2	2	6	9	3	0	0	2	1	2	0	0	4
16,0	0	1	1	3	0	0	0	2	0	0	0	0	1
17,0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0
19,0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
20,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Statistiques Tout secteur

	Weibull-A	Weibull-k	Vitesse moyenne	Densité puissance
Source data	-	-	(not available from the file)	
Fitted	6,7 m/s	2,17	5,97 m/s	230 W/m ²
Emergent	-	-	5,88 m/s	230 W/m ²
Combined	6,6 m/s	2,07	5,88 m/s	230 W/m ²

A et U sont donnés en m/s, P en W/m² et les fréquences d'occurrence en pourcentage (f).

3.3.2 Production électrique.

1) Simulation

La seconde partie consiste à choisir deux aérogénérateurs de même puissance, qui diffèrent sur la conception, l'un a vitesse variable et l'autre vitesse fixe, avec une même hauteur de mat et même diamètre de pales.

En utilisant le logiciel windfarmer pour la simulation et en injectant les résultats trouvés dans la partie gisement tel que la vitesse moyenne du vent, le facteur de forme k le facteur d'échelle c, dans le même site (conditions climatique et l'emplacement [latitude et longitude] identiques). En cherchant sur la bibliothèque du logiciel, Les deux aérogénérateurs trouvés et utilisés sont:

- Generic Turbine 2.0MW(Hauteur 80m, Diamètre rotor 80m) vitesse du rotor variable
- et
- Vestas V80 -2 MW (Hauteur 80m, Diamètre rotor 80m) vitesse du rotor fixe

2) Résultats de la simulation :

Les résultats de la simulation obtenus sont imprimés sur des rapports d'informations générales donnant le résumé de la production énergétique

La production énergétique annuelle (AEP) pour chacun des aérogénérateurs au niveau du même emplacement (longitude et latitude du lieu) a été calculée, en utilisant les mêmes paramètres du site et des données climatiques (vent).

Le tableau comparatif ci-après présente la synthèse des résultats obtenus :

	Generic Turbine 2.0MW	Vestas V80 2.0 MW
Production énergétique idéale	8,3 GWh/an	8.5 GWh/an
Estimation de la production énergétique nette annuelle	8,3 GWh/an	8.5 GWh/an
Hauteur du Mat	80 m	80 m
Diamètre rotor	80 m	80 m
Vitesse moyenne [m/s]	5.88 m/s	5.88 m/s

En comparant la production énergétique annuelle, il est clair que la production de l'aérogénérateur à vitesse variable (marque générique) avec 8,5 GW/h est légèrement plus élevée que la production de l'aérogénérateur à vitesse fixe (marque Vestas) avec 8,3 GW/h.

3.5 Conclusion

Les résultats obtenus permettent de conclure que l'aérogénérateur à vitesse variable produit plus d'énergie électrique que celui à vitesse fixe. Cela est dû principalement aux caractéristiques de ces aérogénérateurs, notamment en ce qui concerne leur courbe de charge et leur comportement en fonction de la vitesse du vent (vitesse de démarrage et vitesse de coupure)

Bibliographie

- [1] B Beltran, “ Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation :Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur”, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale, 2011.
- [2] Tarak Ghennam “ Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Polytechnique d’Alger, 2011.
- [3] Energy efficiency, Energy efficiency indicators, Training, Appliances, Buildings, Industry, Indicators, Transport, Emissions, ETP, Clean energy technologies
- [4] Source Iberdrola, in *Les Échos*, 10 décembre 2007, page 22
- [5](es)[Negocio de Renovables \[archive\]](#), sur le site d'Iberdrola consulté le 29 septembre 2013.
- [6] (en)[Wind - Facts at a Glance \[archive\]](#), sur le site de NextEra Energy Resources consulté le 29 septembre 2013.
- [7](en)[Wind power : 3% of the wind power capacity installed in the world \[archive\]](#), sur le site d'Acciona Energy consulté le 29 septembre 2013.
- [8] (en)[Sell-off of Babcock & Brown's head company looming \[archive\]](#), sur le site du journal The Australian consulté le 29 septembre 2013.
- [9] [L'énergie éolienne représente la filière principale d'EDF Energies Nouvelles \[archive\]](#), sur le site d'EDF-Énergies Nouvelles consulté le 29 septembre 2013.
- [10] (en)[Wind Power \[archive\]](#), sur le site d'ENEL consulté le 29 septembre 2013.
- [11](en)[Our Markets \[archive\]](#), sur le site d'EDP Renewables consulté le 29 septembre 2013.
- [12] (en)[Power Mix \[archive\]](#), sur le site de CPIC consulté le 29 septembre 2013.
- [13]https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Wind_Power_CumulativeCapacity.svg#/media/File:Global_Wind_Power_Cumulative_Capacity.svg
- [14] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices 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,
- [15] C. NICHITA, E. CEANGA, A. PIEL, J.J. BELHACHE, L. PROTIN, “*Real time servosystem for a wind turbine simulator*”, IEEE 3rd Intern. Workshop on Advanced Motion Control, USA, 1994, pp. 1039-1048.
- [16] D.M. EGGLESTON, F.S. STODDARD, *Wind turbine engineering design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York,

Bibliographie

- [17] LIOR international, <http://www.lior-int.com/>
- [18] thèse de Fabienne GRAZZINI- 1999- *Etude expérimentale de la dispersion de polluants en présence d'obstacles*
- [19] Brekken, T. Mohan, N. "A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions". In: IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference, 2003, PESC'03, 15-19 June 2003, vol. 2, pp. 760-764.
- [20] BELFEDAL CHEIKH, « Commande d'une machine a double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie, Oran Algérie 2007.
- [21] Eole, les éoliennes et l'énergie du vent : <http://www.eole.org/>
- [22] N. Laverdure « *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires* » ; thèse doctorat de l'INPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005.
- [23] D.M. EGGLESTON, F.S. STODDARD, *Wind turbine engineering design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2006.
- [24] D. Le GOURIERES, *Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations*, Eyrolles, 2007.
- [25] E. HAU, *Wind-Turbines*, Springer, 2009.
- [26] C. NICHITA, E. CEANGA, A. PIEL, J.J. BELHACHE, L. PROTIN, "Real time servosystem for a wind turbine simulator", IEEE 3rd Intern. Workshop on Advanced Motion Control, USA, 2008.
- [27] thèse Concept&Comand Machine à Aiment pour EnR-Doctorat S.Belkehal 2010.
- [28] D. Le GOURIERES, *Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations* Eyrolles, 1982.
- [29] Thierry DIVEUX, « *Implantation d'un système éolien. Optimisation par algorithmes génétiques* », Thèse LEPT-ENSAM Bordeaux, 29 septembre 2000.
- [30] M.R. PATEL, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999.
- [31] Pour l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique
Option : Commande de Machine Electrique Présenté par : Mohammed MALKI Saïd ALI BELARBI Thème Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret Mémoire soutenu publiquement le 20/10/2014
- [32] Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences en Electrotechnique

Bibliographie

Option : modelisation et Commande des Machine Electrique *Présenté par* : kandouli fairouz Thème centrale eolienne Et qualite de l'énergie électrique Mémoire soutenu publiquement en 2012.

[33] A. Davigny , « Participation aux services système de fermes d'éolienne a vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat.

[34] WWEA : World Wind Energy Association. Publication 2012, « World market recovers and sets a new record : 42 GW of new capacity in 2011, total at 239 GW ». En ligne. <<http://www.wwindea.org/home/index.php>>. Consulté le 20 février 2012.

[35] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[36] A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2009, pp. 24-38.

[37] A. Abdelli, "Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[38] Thèse présentée pour obtenir le grade de Doctorat En Sciences En Electrotechnique Présenté par BOUMARAF Farid Magister en Electrotechnique de l'Université de Batna, 2009 Thème : Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle Soutenu le 24/06/2014

[39] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2010.

[40] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.

[41] Frederic Poitiers. ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone _a cage autonome – Machine asynchrone _a double alimentation reliee au reseau. Electric power. Université de Nantes, 2009. French.