

Module : Systèmes d'énergies autonomes
Niveau : Master 2/ Electronique des systèmes embarqués

Chapitre 2 : Energie éolienne

Historique, principe et structure, Caractéristiques et dimensionnement, Carte du gisement éolien en Algérie, Parcs éoliens et puissance, Normes, Avantages et inconvénients. Exemple d'une installation éolienne.

1. Historique

Capter le vent est l'une des plus anciennes méthodes de production d'énergie. Depuis les temps anciens, l'Homme a utilisé l'énergie éolienne pour moudre du grain ou pour pomper de l'eau. Avec la découverte de l'électricité à la fin du 19^e siècle, les premiers prototypes d'éolienne ont été construits, avec une technologie calquée sur les moulins à vent. Depuis, l'éolien est devenue une source d'énergie à part entière.

La première éolienne destinée à produire de l'électricité était construite par Charles F. Brush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW.

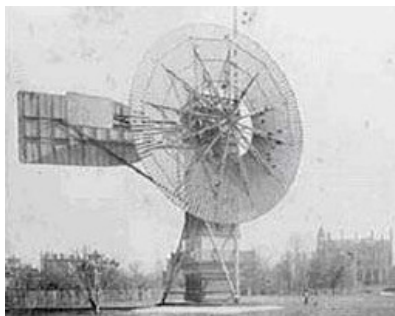


Figure 1. Première éolienne créée par Charles F. Brush

C'est le coup d'envoi de 20 ans d'autonomie assurée grâce à ce dispositif de 18 mètres de haut et de 17 mètres de diamètre.

A peu près au même moment, Poul La Cour établit un prototype bâti sur le terrain de l'école d'Askov en présentant un nombre moindre de pales afin de produire davantage d'électricité en tournant plus vite. C'est la première éolienne dite industrielle. En 1918, dix ans après la mort de celui qu'on surnomme « L'Edison danois », 3 % de l'énergie produite au Danemark provient déjà de l'éolien.

L'arrivée des énergies fossiles à décélérer le progrès des éoliennes puisqu'elles sont moins cher.



Figure 2. Energie fossile.

Au fil des progrès de la mécanique et de l'aérodynamique, la productivité des éoliennes ne cesse de s'améliorer. Pourtant, des vents contraires soufflent sur son développement, la faute au charbon puis au pétrole bon marché, et enfin à la fission de l'uranium.

La crise pétrolière des années 1970, puis le mouvement anti-nucléaire des années 1980 ont fait grandir l'intérêt pour des énergies alternatives et la recherche de sources d'énergie écologiques et économiquement viables. Les éoliennes conçues à cette époque l'étaient essentiellement pour la recherche, et coûtaient extrêmement cher.

1. Energie de vent

L'énergie des vents est 25 à 30 fois la consommation d'énergie de l'humanité et son énergie cinétique est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m_{air} v^2 \tag{1}$$

avec

$$m_{air} = \rho V \tag{2}$$

m_{air} en kg étant la masse de l'air en mouvement.

V en m³ étant le volume de l'air

ρ en kg/m³ étant la densité ou la masse volumique de l'air

Soit un volume V sous forme de disque virtuel de vent en déplacement avec une vitesse v comme le montre la figure 3.

D'où la masse de l'air emprisonnée dans le disque de volume $V = Sl$ sera :

$$m_{air} = \rho V \tag{3}$$

$$V = Sl \tag{4}$$

La distance l est parcourue avec une vitesse v dans un temps t est donnée par :

$$l = vt \tag{5}$$

d'où l'énergie cinétique du vent emprisonné dans disque de volume $V = Sl$ est :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 t \tag{6}$$

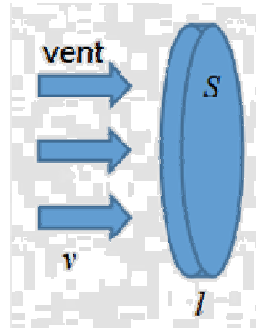


Figure 3. Déplacement d'un volume de vent sous forme de disque

L'énergie peut être calculée par :

$$E_c = P_{vent} \times t \tag{7}$$

Par conséquent, la puissance du vent peut être calculée par :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \tag{8}$$

a. La puissance du vent est proportionnelle à la densité de l'air.

A vitesse égale, la puissance du vent est plus faible en montagne qu'au niveau de la mer comme le montre la figure 5 puisque $\rho_{montagne} < \rho_{mer}$ avec $\rho_{montagne} = 1.027 \text{ kg/m}^3$ pour une montagne de 1800m d'altitude et $\rho_{mer} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ à 15 °C .

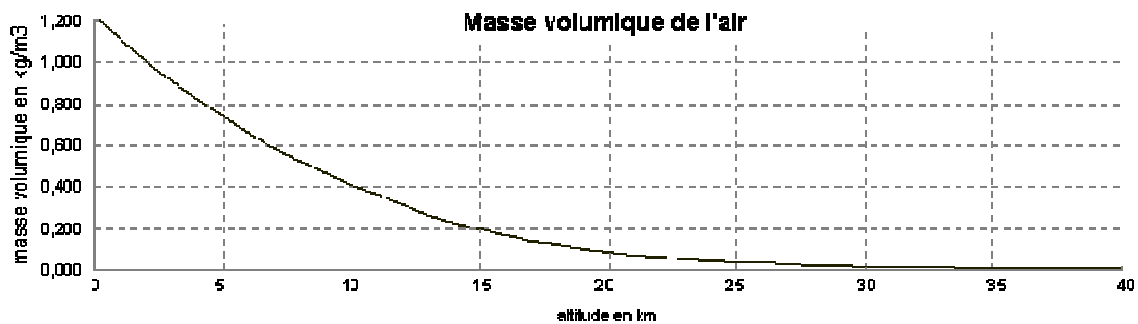


Figure 4. Variation de la densité de l'air en fonction de l'altitude.

b. La puissance est proportionnelle à la surface balayée

Suite à la construction de rotors de plus en plus grands, ces derniers peuvent supportés des pales de 107 m.

c. La puissance est proportionnelle à la vitesse du vent au cube

Cela signifie que $P_{vent} \propto v^3$ d'où il est important de choisir le lieu d'implantation de l'éolienne en étudiant le vent qui peut aller de 6 mois à 1 année si elle n'était pas étudiée auparavant.

2. Carte du gisement éolien en Algérie

La carte des vents en Algérie est donnée dans la figure 5.

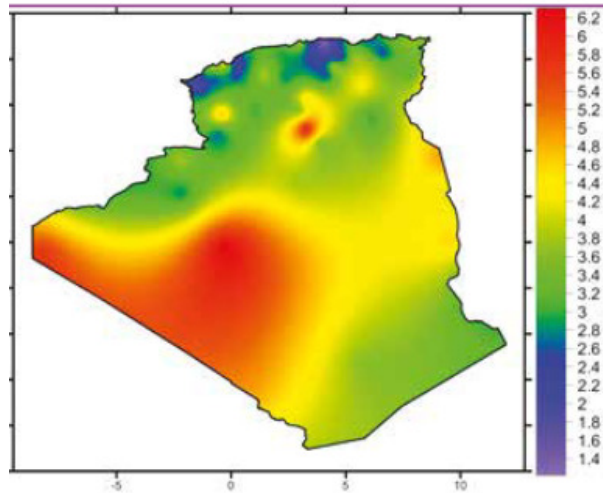


Figure 5. Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur (moyennes annuelles)

La vitesse du vent varie de 1.4m/s à 6.2m/s montrées en bleu et en rouge respectivement dans la carte.

La carte donnant les tendances de vitesses sur un territoire ne permet pas de dire en un lieu précis si le vent est suffisant d'où la nécessité de l'étude des vents en local sur 6 mois à 1 an.

3. Transformations énergétiques dans un système éolienne

La figure 6 montre les différentes transformations énergétiques dans le système éolienne-réseaux

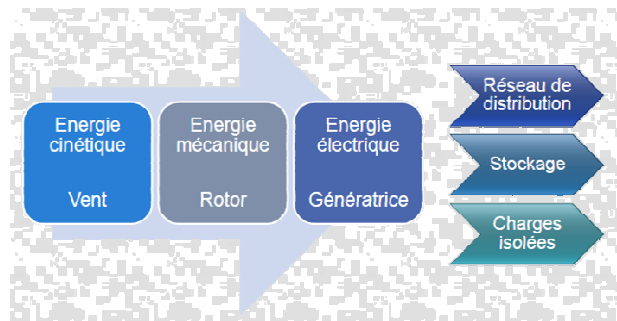


Figure 6. Différentes transformations énergétiques

4. Eoliennes

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie du vent en énergie électrique via une génératrice. Le vent exerce une force sur le rotor via les pales de l'éolienne et le met en rotation : il exerce une certaine puissance.

Classification des éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées suivant leur taille ou suivant leur principe de fonctionnement.

4.1 . Cassification des éoliennes selon la taille

Dans la figure 7 la variation de la puissance de l'éolienne en fonction du rotor est montrée. Il s'agit d'une relation proportionnelle.

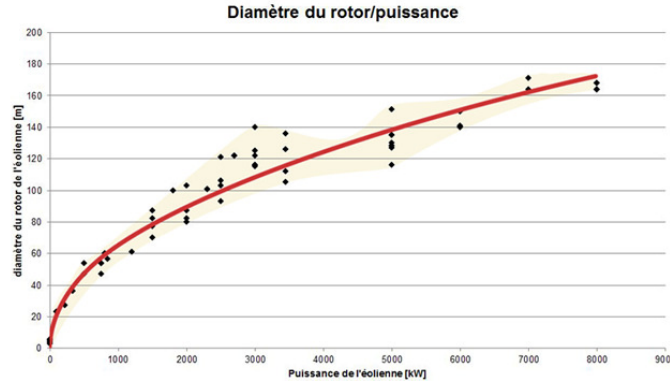


Figure 7. Relation entre le diamètre du rotor et la puissance électrique de sortie basée sur les données techniques de 62 modèles récents d'éoliennes. Une classification des éoliennes selon leurs puissances produites sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Classification des éoliennes.

| Dénomination | Diamètre du rotor [m] | Aire balayée [m ²] | Puissance [kW] |
|---------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Micro | 0,5-1,25 | 0,2-1,2 | 0,1-0,4 |
| Mini | 1,25-3 | 1,2-7,1 | 0,4-2 |
| Domestique | 3-10 | 7-79 | 2-30 |
| Petite commerciale | 10-20 | 79-314 | 30-120 |
| Moyenne commerciale | 20-50 | 314-1963 | 120-750 |
| Grande commerciale | 50-100 | 1963-7854 | 750-3 000 |
| Géante commerciale | 100-170 | 7 854-22 686 | 3 000-8 000 |

- **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.
- **Petites éoliennes commerciales** : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- **Moyennes éoliennes 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.
- **Eoliennes commerciales géantes** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes et également en offshore, elles sont très efficaces et issues des dernières générations technologiques.

4.2. Classification selon le principe de fonctionnement

Les plus connues sont les éoliennes à axe **horizontal** (*HAWT, horizontal axis wind turbine*). Leur typologie est souvent identique. A la base, on a un mât (tour) sur lequel est placée la nacelle, figure 8. Cette nacelle contient la génératrice ainsi que le système de transmission, c'est-à-dire les éléments de couplage mécanique entre le rotor et la génératrice. Celle-ci convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

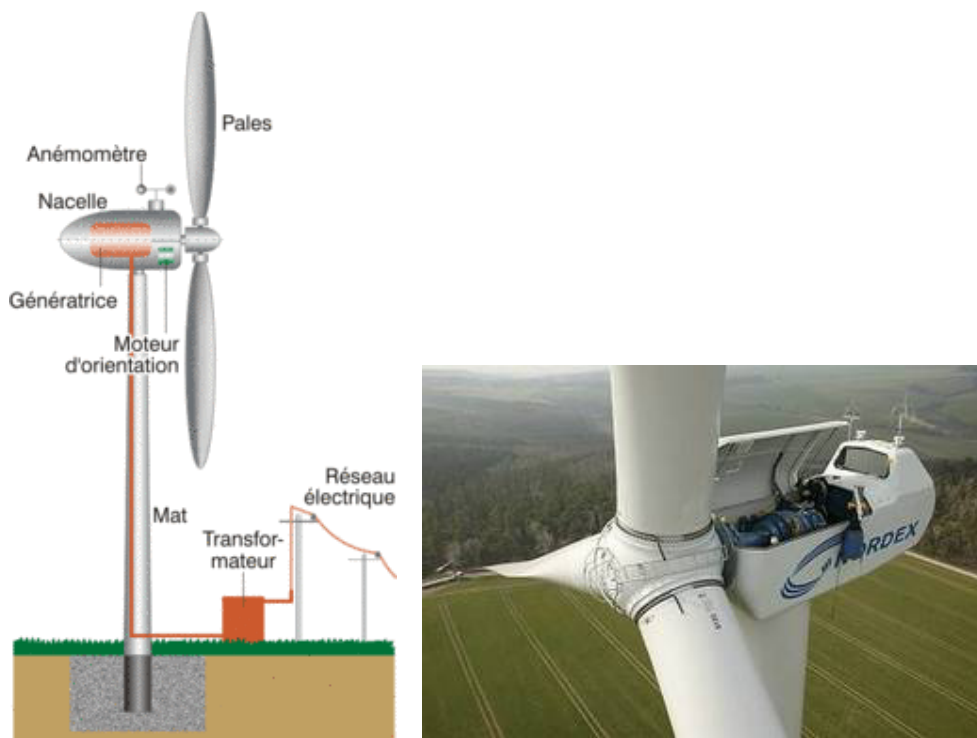


Figure 8. Eolienne axe horizontale

L'éolienne est horizontale lorsque le rotor se situe selon l'axe horizontal comme le montre la figure 8. Il faut un dispositif particulier pour que l'éolienne se positionne correctement par rapport à la direction du vent.

Lorsque l'axe de l'éolienne est vertical comme le montre la figure 9, l'éolienne est dite éolienne verticale.

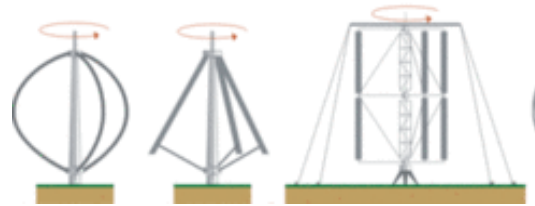


Figure 9. Exemple d'éoliennes verticales.

5. Grand éolien

Les éoliennes actuelles ont une puissance comprise entre 1 et 14 MW (siemens produite en mai 2020).

5.1. Généralités

La taille de l'éolienne (2 fois la longueur de sa pale) est en pleine évolution depuis 1980 en commençant par 20m jusqu'à 214m (turbine d'Haliade-X).

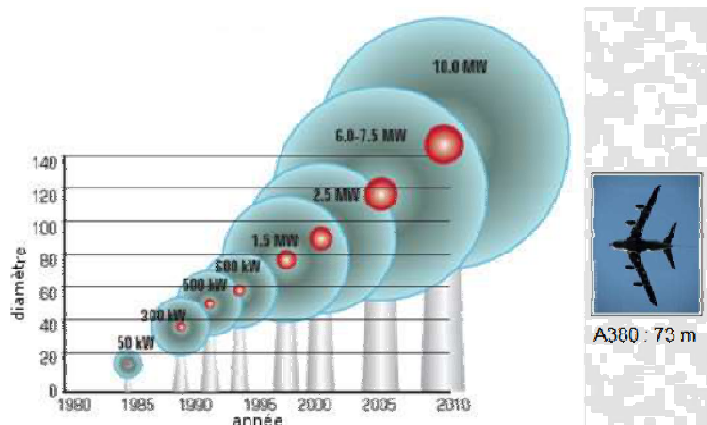


Figure 10. Evolution de la taille des éoliennes depuis 1980 jusqu'à 2010.

5.2. Caractéristiques du grand éolien Haliade-X 12 MW

Le grand éolien Haliade-X 12 MW possède :

- Un rotor de diamètre de 220m.
- Une longueur de pale de 107m.
- Placé à une hauteur de 260m (mat ou tour est de 260m).
- Produit 67GWh.
- Alimente 16000 foyers.
- Surface balayée par cette éolienne est de 38000m².

La figure 11 montre la nacelle du grand éolien Haliade-X 12 MW. Dans la figure 12, le grand éolien Haliade-X 12 MW est implanté. La figure 13 montre une comparaison en matière d'hauteur du grand éolien Haliade-X 12 MW.



Figure 10. Nacelle de l'éolienne Haliade-X 12 MW



Figure 12. Grand éolien Haliade-X 12 MW implanté

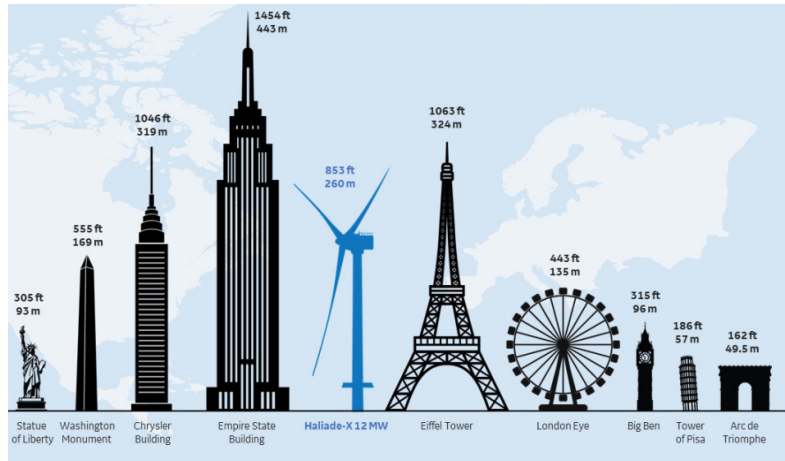


Figure 13. Grand éolien Haliade-X 12 MW par rapport aux patrimoines d'hauteurs connus au monde.

6. Structure d'une éolienne

L'éolienne est constituée de :

- Pales.
- Arbre primaire.
- Multiplicateur
- Arbre rapide ou arbre secondaire.
- Génératrice.
- Contrôleur électronique.
- Outils de mesure.
- Refroidisseurs.
- Système d'orientation.
- Mât ou tour.

6.1. Pales

Les pales sont faites de fibre de verre et carbone et matériaux composites. Leurs longueurs vont de 40 à 107 mètres et leur masse varie de 6 à plus de 25 tonnes. Le rotor est constitué de 3 pales montées sur un hub.

Remarque : Le diamètre du rotor du grand éolien égale 2 fois la longueur de la pale plus le diamètre de son hub.

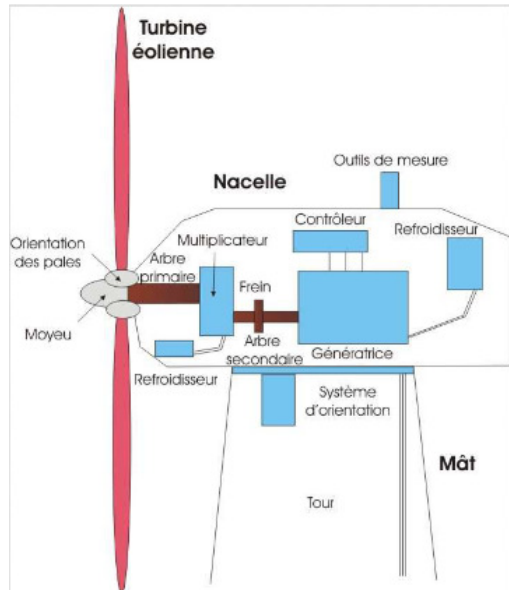


Figure 14. Deux pales sont montrées en rouge dans la structure de l'éolienne

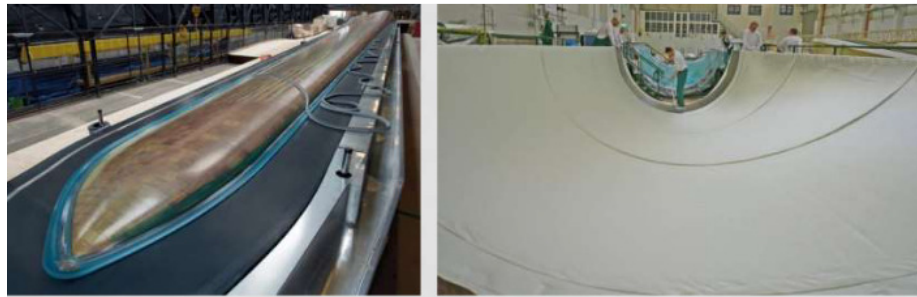


Figure 15. Moulage d'une pale d'éolienne.

6.2. Arbre primaire

Il s'agit de l'arbre du rotor de la turbine éolienne. IL tourne avec une vitesse de rotation allant de 10 tours/minute (tr/min) à plus 25 tr/min. IL est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur comme le représente la figure 16 dans laquelle il est montré en rouge.

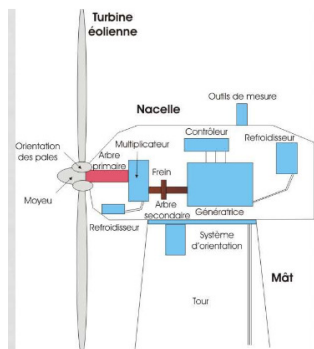


Figure 15. Arbre du rotor de la turbine éolienne montré en rouge.

6.3. Multiplicateur

Le multiplicateur ou boîte de vitesse permet de faire passer la vitesse de rotation de 20-40 tr/min à 1500 tr/min à l'aide d'engrenages. La vitesse de 1500tr/min est nécessaire pour faire fonctionner la génératrice (d'une manière optimale). La figure 16 montre les engrenages du multiplicateur.



. Figure 16. Multiplicateur et ses engrenages.

La figure 17 montre le multiplicateur en rouge dans la structure de l'éolienne.

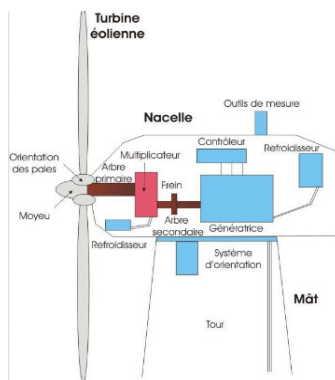


Figure 17 Multiplicateur de l'éolienne en rouge

6.4. Arbre rapide ou arbre secondaire

IL relie le multiplicateur à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque pour arrêter la rotation en cas de grand vent.

Figure 18 montre l'arbre secondaire et son frein en rouge dans la structure de l'éolienne et .

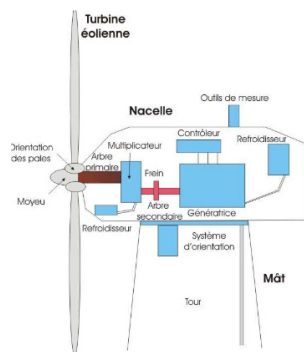


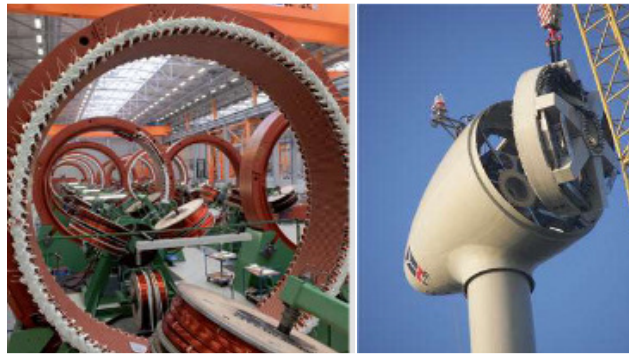
Figure 18 Arbre secondaire et son frein en rouge

6.5. Génératrice

La génératrice produit jusque 7,5 MW de puissance en transformant l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être :

- Machine asynchrone avec multiplicateur
- Machine synchrone qui sera une génératrice annulaire sans multiplicateur.

La figure 19 montre une génératrice annulaire et une génératrice en montage. La figure 20 montre en rouge la génératrice dans la structure de l'éolienne.



(a) (b)
Figure 19. Génératrice (a) annulaire (b) en montage.

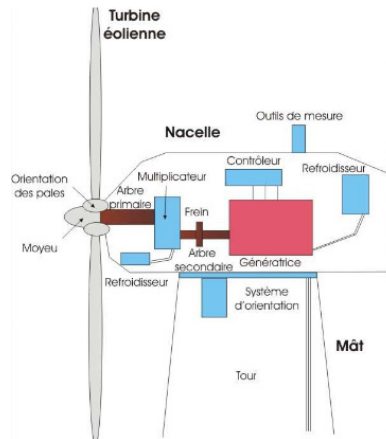


Figure 20. En rouge la génératrice dans la structure de l'éolienne.

6.6. Contrôleur électronique

Le contrôleur électronique est le cerveau de l'éolienne. Il contrôle le fonctionnement général de l'éolienne qui comporte entre 100 à 500 paramètres. Parmi autre, il contrôle le démarrage, freinage, orientation des pales et de la nacelle, refroidissement du générateur ...Il est en lien permanent avec le système de mesure (anémomètre, girouette).

La figure 20 montre un contrôleur d'une éolienne et la figure 21 montre en rouge l'emplacement du contrôleur électronique dans la structure de l'éolienne.



Figure 20 Contrôleur d'une éolienne

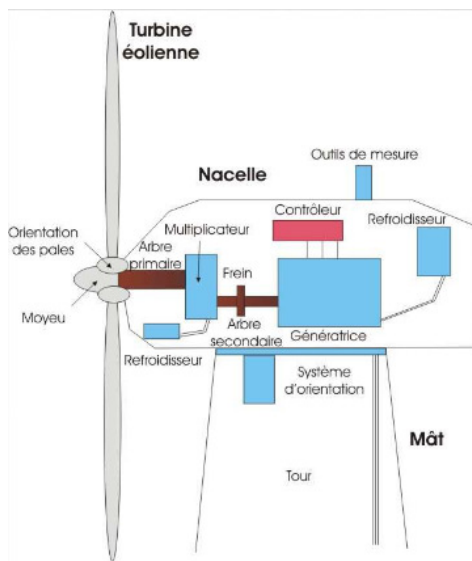


Figure 21 Emplacement du contrôleur électronique montré en rouge dans la structure de l'éolienne.

6.8. Outils de mesure

Les outils de mesure montrés dans la figure 22 sont montés sur la nacelle de l'éolienne à l'endroit représenté en rouge dans la figure 23 sont composés de :

- Anémomètre qui permet la mesure de la vitesse du vent.
- Girouette qui assure le suivie de la direction du vent.

Les outils de mesure sont en lien permanent avec le système de contrôle commande.

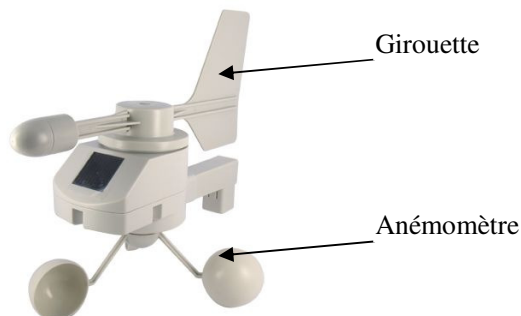


Figure 22. Outils de mesure de l'éolienne : anémomètre et girouette

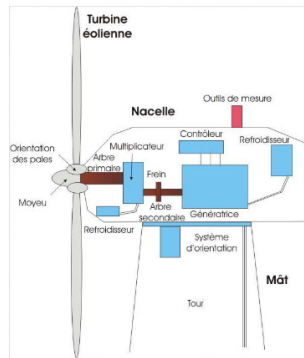


Figure 23. L'endroit des outils de mesure sur la nacelle est en rouge.

6.8. Refroidissements

Le refroidissement de la génératrice et le multiplicateur est indispensable. Les refroidisseurs employés sont :

- Ventilateurs.
- Radiateurs à eau et à huile.

Les blocs comportant les refroidisseurs sont montrés en rouge dans la figure 24.

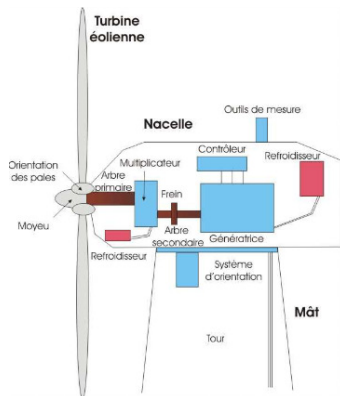


Figure 24 Refroidisseurs montrés en rouge

6.9. Système d'orientation

Des moteurs électriques font pivoter la nacelle (roue dentée ou crémaillère) pour placer le rotor face au vent pour une collecte maximale d'énergie de vent.

Le système d'orientation est monté sur le mât comme il est représenté dans la figure 25.

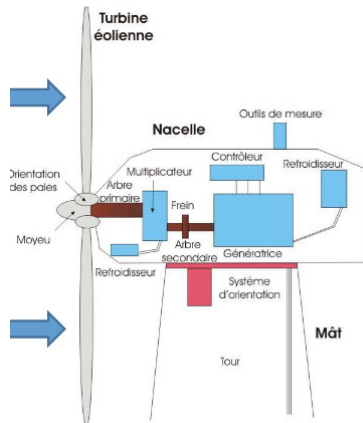


Figure 25 Système d'orientation montré en rouge monté sur le mât.

La masse de la nacelle varie de 300 tonnes à plus de 500 tonnes. Ces valeurs sont données pour avoir une idée sur le poids que le système d'orientation devra orienter pour que le rotor soit face au vent.

6.10. Mât (ou tour)

Le mât assure les tâches suivantes :

- Porte la nacelle et les pales.
- Renferme les câbles qui assurent la liaison avec le réseau de distribution.
- Permet l'accès à la nacelle via une échelle ou un ascenseur, figure 26.

Il est de hauteur allant de 40m à plus de 100m. Il est de deux types, figure 27:

- Acier pesant jusqu'à plus de 100 tonnes.
- Béton pesant jusqu'à plus de 250 tonnes.

Le mât a une fondation qui pèse jusqu'à plus de 300 tonnes, de diamètre qui peut aller jusqu'à plus de 20 m sur une profondeur allant à plus de 3.5m, figure 28.

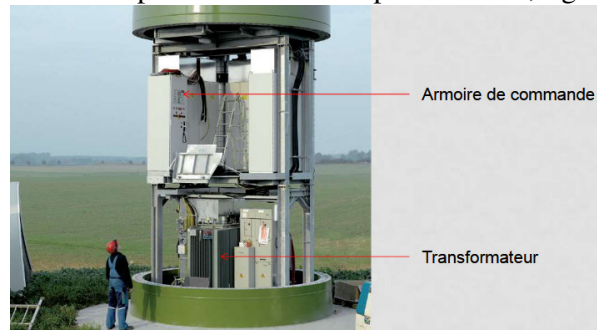


Figure 26. Intérieur d'un mât d'éolienne



Figure 27. Mât (a) en acier (b) en béton

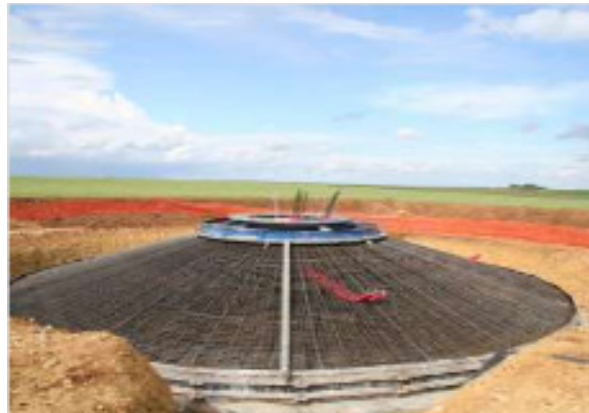


Figure 28. Fondation d'une éolienne

7. Choix du site de l'éolienne

Le site de l'éolienne est choisi par rapport au :

- Vent
- Grandeur de terrain disponible
- Importance des obstacles
- Contraintes environnementales imposées

7.1. Importance du vent

La puissance du vent est calculée par $P_a = \frac{1}{2} \rho S v^3$. D'où, il faut effectuer des mesures sur une période de 6 mois à 1 an et à une hauteur de 50 m du sol. La vitesse moyenne minimale requise du vent est de 6 m/s

7.2. Grandeur de terrain disponible

Il faut prendre en considération la circulation des convois exceptionnels près du champ de l'éolienne et assuré une distance entre éoliennes allant de 200 à 400 m.

7.3. Importance des obstacles

La présence des bâtiments et des arbres dans le site de l'éolienne à sa grande importance.

7.4. Contraintes environnementales

Il faut prendre en compte aussi la possibilité de passage d'oiseaux protégés, et la présence des monuments historiques ainsi que l'acceptabilité de la population d'implanter l'éolienne.

8. Puissance du vent et puissance d'une éolienne

La puissance du vent emprisonnée dans un volume de forme de disque est $P_a = \frac{1}{2}\rho S v^3$ avec S étant la surface de disque. Mais la puissance qui peut être générée par l'éolienne en sortie de la génératrice est :

$$P_a = \frac{1}{2}\rho S v^3 C_p \tag{9}$$

Avec C_p étant le facteur de performance qui dépend aussi de la vitesse du vent.

En fait,

$$C_p = \eta_{\text{rotor}} \times \eta_{\text{multiplicateur}} \times \eta_{\text{coupleur}} \times \eta_{\text{génératrice}} \tag{10}$$

Avec η est le rendement.

η_{rotor} est le rendement du rotor (rotor est composé des pales et el hub).

$\eta_{\text{multiplicateur}}$ est le rendement du multiplicateur.

η_{coupleur} est le rendement du coupleur (le coupleur relie l'arbre secondaire à la génératrice).

Dans la figure 29 est montrée la puissance en sortie de la génératrice.

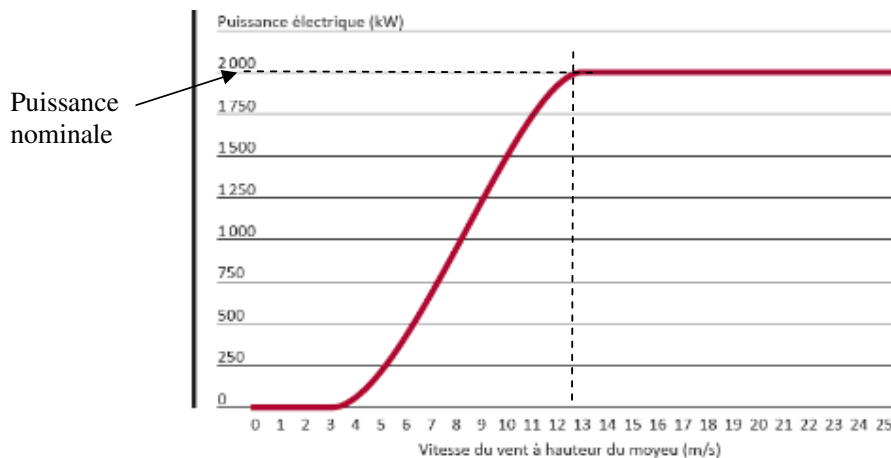


Figure 29 Puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent

Toutes les éoliennes commencent à tourner à partir de 4m/s. La puissance de l'éolienne augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent et doit être arrêté à la vitesse de 25m/s qui est 90km/h pour ne pas la dépasser. A partir de cette vitesse l'éolienne doit être totalement freinée ou elle sera détruite puisque cette vitesse correspond à la vitesse du bout de la pale de 585km/h pour un $C_p=6.5$. Le freinage est un freinage aérodynamique et peut être réalisé en pivotant les pales pour réaliser un angle de calage de 90° alors qu'il était 0° ce qu'ont appelle la mise en drapeau. Pour les éoliennes dont le pâles ne pivotent pas, leurs bouts (bouts de pâles) peuvent être mis en drapeau. Il est impossible d'utiliser le freinage mécanique à ces vitesses excessives.

Pour une vitesse du vent de 14m/s qui correspond à 50.4km/h, la vitesse tangentielle du bout de pale sera 300km/m. Cette vitesse donnera naissance à l'effet Stall qui jouera le rôle d'un frein aérodynamique pour ramener la vitesse des pales à 300km/h si la vitesse du vent dépasse 50.4km/h

Par conséquent la vitesse autorisée à l'éolienne pour des vitesses du vent qui dépassent 50km est toujours 50km. C.à.d. : Si $v_{\text{vent}} > 50\text{km/h}$, la vitesse de la masse du vent enfermée dans le disque virtuel de surface S de diamètre 2 fois longueurs de la pale est toujours 50km/h.

8.1. Coefficient de puissance C_p

A cause de la vitesse non nulle de l'air derrière l'éolienne (derrière le rotor qui est pâles et hub), la puissance de l'éolienne $P_{\text{éolienne}} < P_{\text{vent}}$ sera inférieure à la puissance du vent. Par conséquent, un facteur de performance (rendement du rotor) doit être définit comme :

$$C_p = P_{\text{éolienne}} / P_{\text{vent}} \tag{10}$$

Avec comme limite maximale de puissance récupérable celle donnée par Betz :

$$P_{\text{max}} = 16/27 P_{\text{vent}} = 0,59 P_{\text{vent}} = 0,59 \left(\frac{1}{2} \rho S v^3\right) \tag{11}$$

Dans la figure 30 sont représentées des courbes réelle d'éolienne ayant une vitesse nominale est 15m/s. Sa puissance nominale est de 1300KW, diamètre de rotor est de 60m. Elle démarre à 4m/s comme la majorité des éoliennes. Cp est max et il est de 0.42 à environ à 8m/s de vitesse de vent.

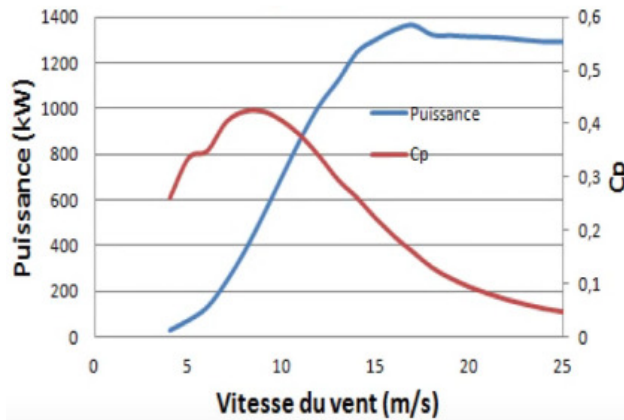


Figure 30 Courbes réelle d'une éolienne

8.2. Production d'une éolienne

Une éolienne ne produit pas 24h/24 et 365 jours par an comme pourrait (presque) le faire une centrale classique (nucléaire ou thermique) mais uniquement lorsque le vent est suffisant.

Généralement, la durée de fonctionnement est de 2 à 3000 heures à puissance nominale (on parle d'heures équivalent pleine puissance)

Le taux de charge se calcule par :

$$T_c = \text{Energie annuelle produite} / (8760 \times \text{puissance nominale}) \tag{12}$$

T_c est de 20 % (onshore) à 30 % (offshore).

8.3 Avantages et inconvénients de l'éolienne à trois pales

Le choix de trois est justifié par le fait que cette éolienne est caractérisé par le maximale coefficient de performance C_p qui peut atteindre 0.48 mais elle un inconvénient clés qui est la vitesse de de démarrage de l'éolienne de 4m/s à 5m/s. Cela signifie qu'à des vitesse inférieure à la vitesse de démarrage l'éolienne ne produit pas de puissance alors que d'autres types telles que Rotor Savonius, le moulin au vent ou le rotor américain de vent qui peuvent tourner aux vitesses inférieures comme le représente la figure 31.

$$\lambda = V_{\text{éoliennes}} / V_{\text{vent}} \tag{13}$$

Le C_p de 0.48 pour l'éolienne à trois pale est atteint lorsque $\lambda=7$. Par conséquent, si la vitesse du vent est de 50km/h, la vitesse du bout de pale de l'éolienne sera 350km/h qui est très grande et il faut diminuer la vitesse de l'éolienne via les deux modes de freinage : Pitch où les pales pivote avec un certain degré pour ou bien via le freinage aérodynamique effet Stall lorsque les pâles si elles sont bien conçues pour fonctionner ainsi (les pales usinées avec un angle de vrillage (twist) permettant le décrochage du freinage aérodynamique).

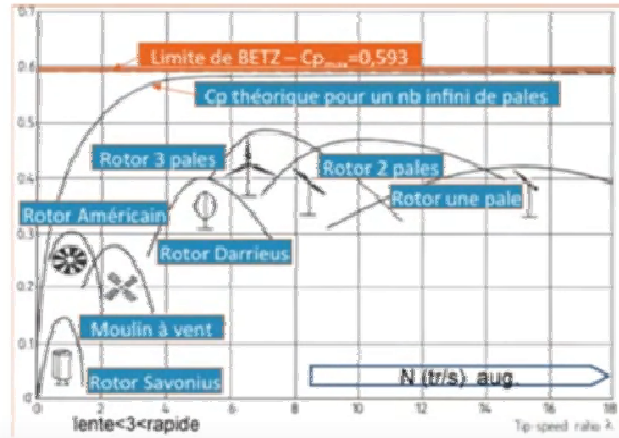


Figure 31. Variation de Cp en fonction de λ pour différents types d'éoliennes

8.4. Hauteur du Mât (Tour)

En montant en hauteur la vitesse du vent augmente comme il est représenté dans la figure 32.

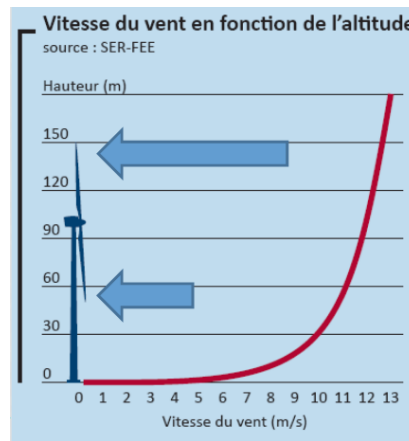


Figure 32. Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude

Si la vitesse moyenne du vent v_0 est connue à une hauteur H_0 , la vitesse moyenne du vent est vitesse v à une hauteur H peut être calculée par :

$$v = v_0 [H/H_0]^\alpha \tag{14}$$

α est le coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent.

Exemple

La vitesse moyenne du vent dans un site donné à 10 m d'hauteur est mesurée d'être $v_0=5,05$ m/s. A 24 m d'hauteur avec des haies ($\alpha=0.21$), la vitesse moyenne du vent sera :

$$v_{24m} = 5.05 [24/10]^{0.21} = 6.07 \text{ m/s}$$

Dans le tableau 2 sont données les différentes valeurs de α

Tableau 2 sont données les différentes valeurs de α .

| Topographie du lieu | Coefficient α |
|-----------------------------------|----------------------|
| Glace | 0,07 |
| Neige sur sol plat | 0,09 |
| Mer calme | 0,09 |
| Littoral avec brise de mer | 0,11 |
| Herbe coupée | 0,14 |
| Prairie à herbe courte | 0,16 |
| Cultures, prairie à herbe haute | 0,19 |
| Haies | 0,21 |
| Arbres et haies épars | 0,24 |
| Arbres, haies, quelques bâtiments | 0,29 |
| Banlieues | 0,31 |
| Bois | 0,43 |