

Chapitre 3 : L'énergie éolienne

3.1 Introduction

L'énergie éolienne figure parmi les cinq familles des énergies renouvelables, elle est due au vent. Le vent présente le déplacement de l'air causé par les différences de température et de pression dans l'atmosphère. En effet, l'air chaud est plus léger que l'air froid. C'est pourquoi, quand le Soleil chauffe la mer ou le sol, l'air qui se trouve juste au-dessus se réchauffe, s'allège, et monte, en poussant l'air froid qui est plus haut. L'air froid, plus lourd, descend et vient remplacer l'air chaud, puis il se réchauffe à son tour, et ainsi de suite.

En plus, comme la Terre est ronde, le Soleil ne distribue pas la chaleur partout de façon égale, et celle-ci n'est pas absorbée de la même manière par la mer ou par le sol. Toutes ces différences font que les masses d'air se déplacent verticalement et horizontalement.

3.2 Principe de l'énergie éolienne

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moudre du grain battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité. Depuis quelques années, la production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux atouts : c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui utilise les ressources nationales et concourt donc à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements. Enfin, le démantèlement des installations et la gestion des déchets générés pourront se faire sans difficultés majeures et les sites d'implantation pourront être réutilisés pour d'autres usages.

Le principe de production de cette énergie consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour tourner le rotor qui va produire une énergie électrique génératrice pour des applications divers : le stockage dans des accumulateurs, directement reliée au réseau de distribution ou être utilisée dans des sites isolés, comme le montre la figure 3.1.

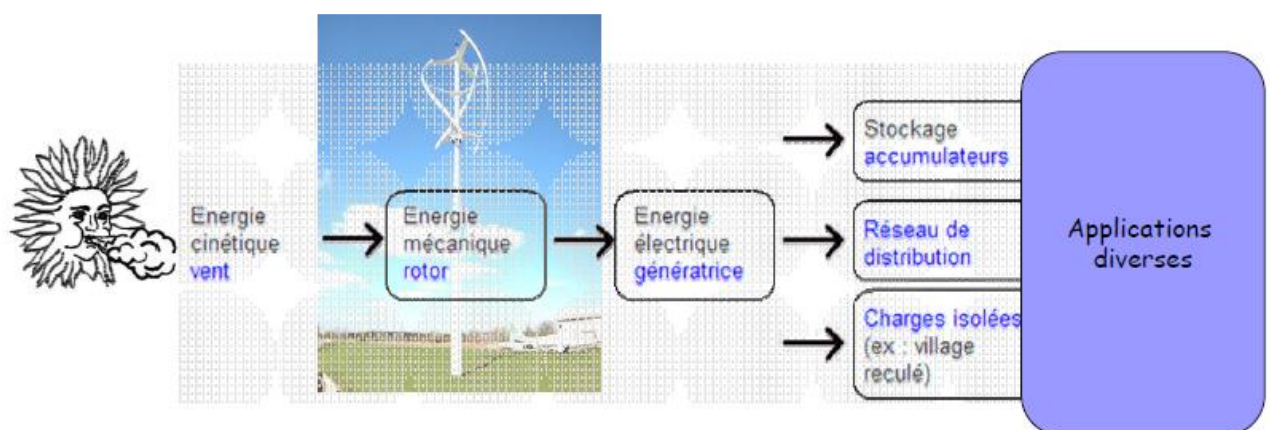


Figure 3.1 : Principe de production de l'énergie éolienne.

3.3 Les familles des aérogénérateurs

Il existe deux familles des aérogénérateurs ; les aérogénérateurs à axe vertical et aérogénérateurs à axe horizontal.

A. L'éolienne à axe vertical :

On peut distinguer deux types la Savonius et Darrieus.

La **Savonius** est constituée de plusieurs godets demi-cylindriques légèrement désaxés. L'éolienne démarre à de faibles vitesses de vent et présente un couple élevé (variant de façon sinusoïdale au cours de la rotation). Elle présente les avantages et les inconvénients suivants.

Avantages :

- peu bruyant.
- pas de dispositifs d'orientation
- possibilité de placer toute la machinerie dans un local sous terre, réduction de l'encombrement et maintenance facilitée.
- démarrage à vents faibles

Inconvénients :

- couple non constant
- faible rendement
- masse importante de l'installation et des pâles

Dans le cas de l'aérogénérateur de type Darrieus

Avantages :

- pas de dispositifs d'orientation
- possibilité de placer toute la machinerie dans un local sous terre : réduction de l'encombrement et maintenance facilitée.

Inconvénients :

- nécessité d'un dispositif de lancement moteur auxiliaire ou génératrice réversible ce qui implique un niveau de bruit supplémentaire.
- surcoût de fabrication des pâles.

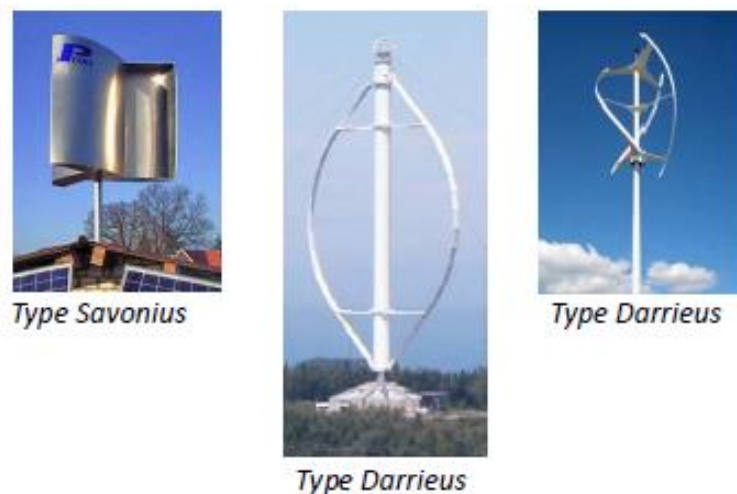


Figure 3.2 : Les aérogénérateurs à axe vertical.

B. L'éolienne à axe horizontal

La quasi-totalité des machines installées dans le monde sont à axe horizontal.

Avantages :

- vitesse variable + électronique de puissance, ce qui implique production surfacique (kWh/m²) plus élevé.
- Bon rendement ;
- De structure stable .

Inconvénients :

- système de guidage pour un fonctionnement face au vent
- Bruyants, peu esthétiques ;
- vitesse de rotation assez faible (~qq 10 tr/min)
- multiplicateur lourd, encombrant, parfois bruyant pour atteindre les 1500 tr/min nécessaires pour produire un courant à 50 Hz.



Figure 3.2 : Les aérogénérateurs à axe horizontal.

3.4 Composition d'un aérogénérateur

Une éolienne est constituée d'un **mât** de 50 à 100 m de haut. A son sommet se trouve une **nacelle** équipé d'un rotor à axe horizontal, lui-même équipé de trois **pales** mise en rotation par le vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. L'énergie mécanique ainsi produite est transformée en énergie électrique dans la nacelle grâce à une génératrice (phénomène d'induction) qui délivre un courant alternatif de ~690 volts dont l'intensité varie avec la vitesse.

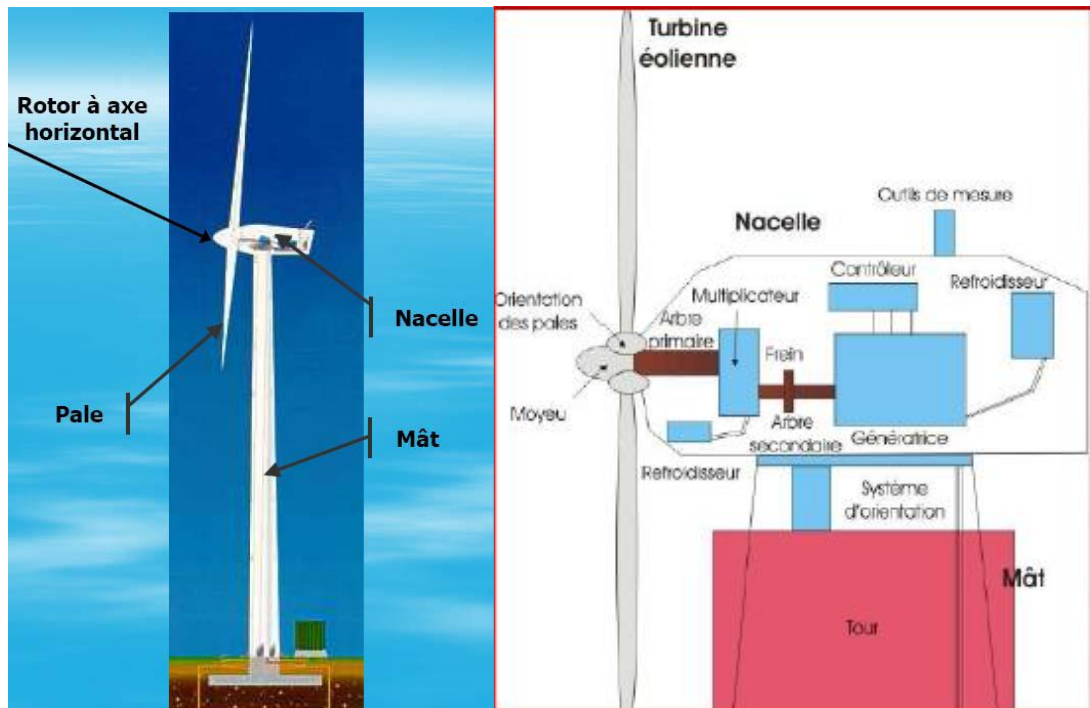


Figure 3.3 : Composition d'un aérogénérateur horizontal.

3.4.1 Mat : Appelé aussi Tour, il est de forme tubulaire fabriqué en acier, il mesure de 40 à 100m. Son rôle est l'accès à la nacelle, il peut contenir transformateur.



- (1) Armoire de commande
- (2) Transformateur

Figure 3.4 : Le mat.

3.4.2 L'anémomètre : c'est une Girouette de différentes technologies qui reliée est au système de contrôle commande.



Figure 3.5 : L'anémomètre.

3.4.3 Le système d'orientation : il permet de mettre :

- Rotor face au vent
- Moteurs électriques et multiplicateurs
- Pivotement de la nacelle
- Couronne dentée (crémaillère)

La couronne permet d'orienter l'éolienne dans l'axe du vent et la bloquée (frein)



Figure 3.6 : Le système d'orientation.

3.4.4 Les pales

Le système des pales est composé de fibre de verre et matériaux composites. Le système tripale est préféré car il limite les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor. Le couple de démarrage dépend du diamètre.

- D=7m donne P=10kW
- D=27m donne P=200kW
- D=72m donne P=2000kW

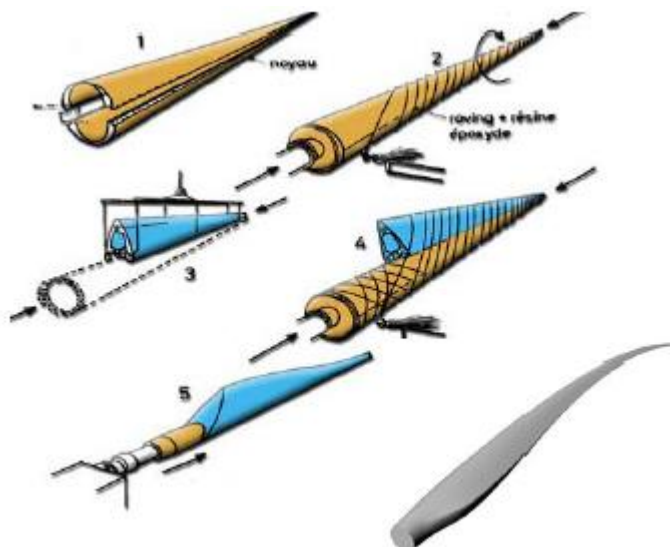


Figure 3.7 : Les pales .

3.4.5 L'arbre primaire : il est dit « arbre lent », il reçoit la rotation du moyeu de l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Sa vitesse de rotation : 20-40 tr/min. Il relie l'arbre secondaire par le multiplicateur



Figure 3.8 : L'arbre primaire.

3.4.6 Le multiplicateur : Il relie l'arbre primaire au secondaire, il est constitué d'engrenages. Il fait des passages de 20-40tr/min à 1500tr/min.



Figure 3.9 : Le multiplicateur.

3.4.7 Le frein –arbre secondaire : il est dit « arbre rapide », il est plus mince. Il relie le multiplicateur à la génératrice, il est équipé d'un frein à disque (sécurité vent).



Figure 3.10 : Le frein-arbre secondaire.

3.4.8 La génératrice : Elle permet de :

- Transforme E mécanique en E électrique
- Jusqu'à 7,5MW de puissance
- Machine asynchrone (si multiplicateur)
- ✓ peu utilisée en site isolé
- ✓ nécessite condensateurs - corriger Q_{reac}
- Machine synchrone (sans multiplicateur)
- ✓ - aimants permanents ou électroaimants
- Courant alternatif (alternateur: rotor et stator)



Figure 3.11 : Le frein-arbre secondaire.

3.4.9 Le contrôleur électronique : il permet le :

- Contrôle le fonctionnement de l'éolienne
- Gère 100-500 paramètres
- Gère le démarrage, le freinage
- Gère l'orientation de la nacelle / vent
- Gère le pas des pâles
- Gère le refroidissement
- Relié à la girouette



Contrôleur Enercon en pied de mât

Figure 3.12 : Le contrôleur électronique.

3.5 Etude théorique d'une éolienne

1. L'énergie cinétique :

Le **vent** est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une **énergie cinétique**, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad m : \text{masse du volume d'air (en kg)}$$

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_c : énergie cinétique (en joules)

2. La masse de l'air:

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air possède une masse volumique d'environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la masse volumique de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

masse de l'air

$$m = \rho \cdot V$$

m : masse du volume d'air (en kg)

V : volume d'air occupé (en m³)

ρ : masse volumique (en kg/m³)

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le **rotor** de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

3. Energie théoriquement récupérable :

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface S et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égale à vS .

Puissance théoriquement récupérable

$$P = E_{c/s} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v \cdot S \cdot v^2$$

P : puissance récupérable (Watt)

m : débit massique du volume d'air traversant la surface S en 1 seconde (kg/s)

ρ_0 : masse volumique de l'air (kg/m³)

v : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

S : surface du dispositif de récupération (m^2)

vS : débit volumique d'air (m^3/s)

Ce qui revient à la formule qui suit.

4. Puissance du vent contenue dans un cylindre de section S

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

ρ : masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : $1,23 \text{ kg/m}^3$ à 15°C et à pression atmosphérique $1,0132 \text{ bar}$)

La masse volumique (ρ) varie avec différents paramètres :

- **l'altitude** (pression de l'air) : plus l'altitude est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une même éolienne produira plus en bord de mer qu'en haute montagne avec la même vitesse de vent.
- **la température** : plus la température est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une éolienne produira plus lorsque la température ambiante sera faible
- **l'humidité relative** de l'air : plus l'air sera humide et plus la masse volumique sera faible mais l'influence de l'humidité relative de l'air sur la masse volumique reste relativement faible

S : surface du capteur éolien (en m^2)

v : vitesse du vent (en m/s)

Cette puissance (en Watt) est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent).

La puissance dépend donc de la vitesse, de la surface des pales (qui doivent être face au vent) mais aussi d'autres paramètres structuraux qui soulignent l'importance portée à la qualité de la conception de l'éolienne, notamment son rotor (orientable).

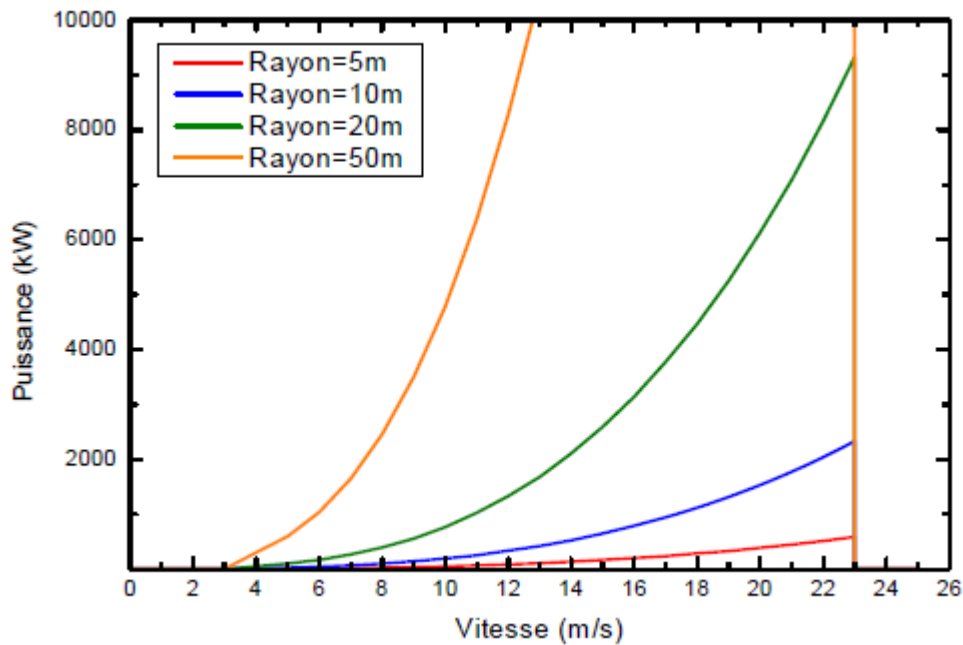


Figure 3.13 : Variation de la puissance en fonction de la vitesse.

Mais voilà: la puissance disponible dépend de la hauteur

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \quad \Rightarrow \quad \frac{V_e}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad \Rightarrow \quad P \propto V_o^3 \cdot \left(\frac{h}{h_o} \right)^{3\alpha}$$

V_e vitesse du vent à la hauteur h du rotor

h_o hauteur de référence pour la vitesse mesurée V_o

V_o vitesse du vent à la hauteur h_o

α le coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent

5. Les éoliennes détournent le vent

En pratique, une éolienne sert à récupérer l'énergie du vent, en contrepartie celle-ci dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent (voir loi de Betz). Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

6. Limite de Betz /Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

La puissance maximale récupérable

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{8}{27} \cdot \rho S \cdot v^3$$

avec $P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$, lorsque $v_{aval} = \frac{1}{3} \cdot v_{amont}$

ρ : masse volumique du fluide (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

S : surface du capteur éolien (en m²)

v : vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à $\frac{16}{27}$, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

$$P = 0,37 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot v^3$$

$$P = 0,29 \cdot D^2 \cdot v^3$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle :

- au **carré** des dimensions du rotor
- au **cube** de la vitesse du vent

Courbe ci-contre pour une hélice de diamètre D = 1m.

7. Puissance disponible

Mais voilà: la puissance disponible dépend du facteur de puissance C_p de la machine

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \quad \Rightarrow \quad \boxed{C_p} \quad \Rightarrow \quad P_{elec} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V_e^3$$

Puissance en entrée de l'aérogénérateur **Coefficient de performance (0.4 pour les éoliennes actuelles)** *Puissance en sortie de génératrice*

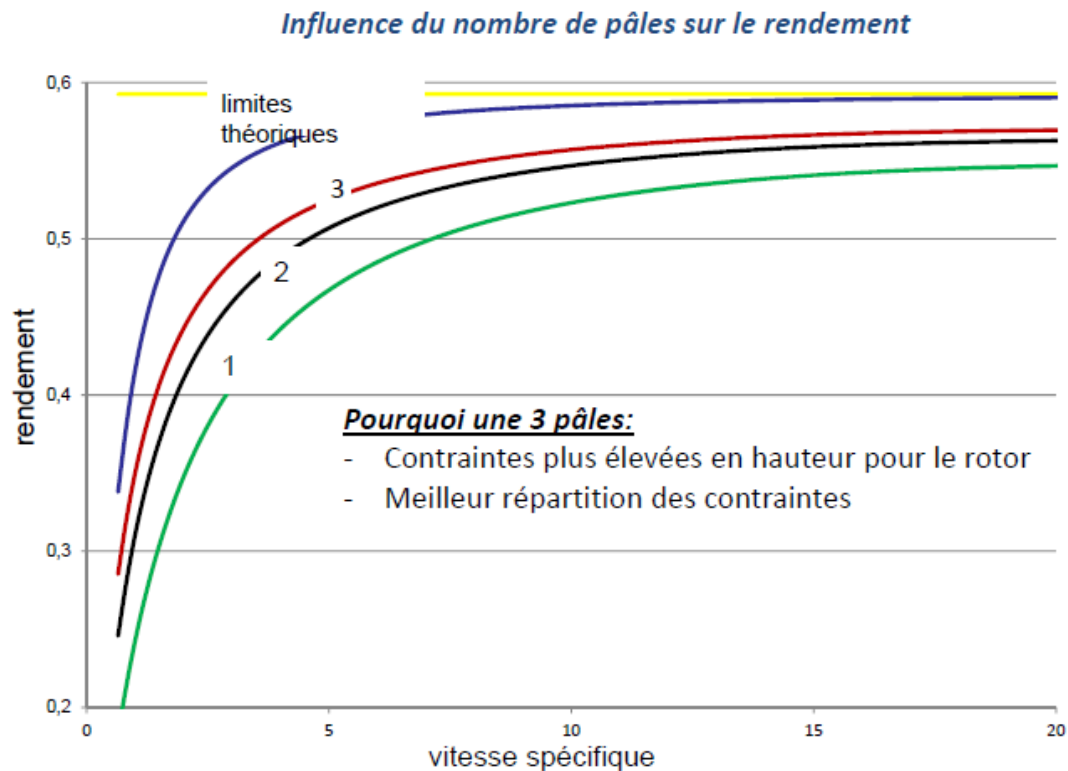
8. Rendement

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant convertit d'une forme à une autre, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- Hélice : $0,20 < \eta < 0,85$
- Le multiplicateur ou le réducteur : $0,7 < \eta < 0,98$
- L'alternateur ou la génératrice continue : $0,80 < \eta < 0,98$

- Le transformateur : $0,85 < \eta < 0,98$
- Le redresseur : $0,9 < \eta < 0,98$
- Les batteries : $0,7 < \eta < 0,8$
- Les pertes de lignes : $0,9 < \eta < 0,99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.



Le potentiel éolien

La distribution de Weibull

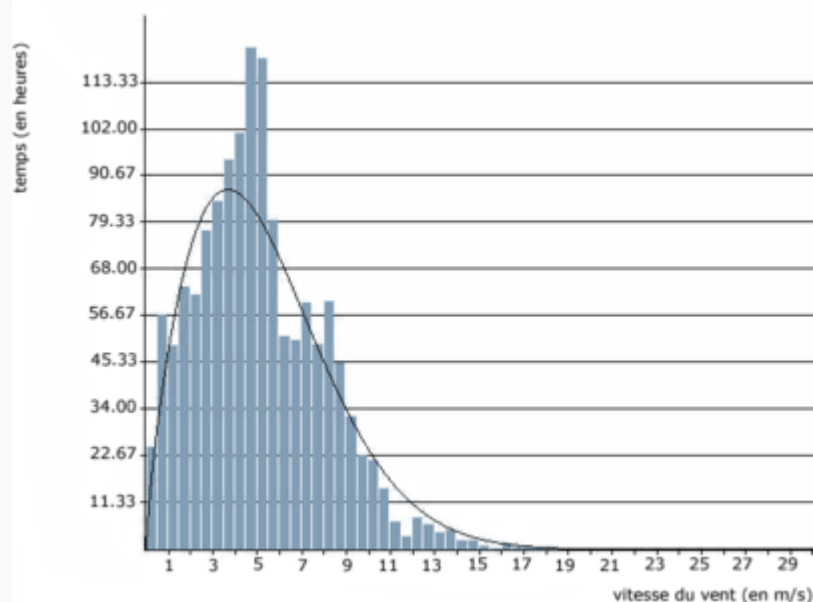


Figure 3.14 : Répartition de la vitesse du vent.

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull comme celle que vous voyez sur l'image ci-contre. C'est le modèle général qui décrit les variations de la vitesse du [vent](#). Ce modèle permet d'optimiser la conception des [éoliennes](#) pour minimiser les coûts liés à la production d'électricité.

Le coefficient de Weibull traduit la distribution des vitesses du vent et est déterminé par la courbe de distribution Weibull.

Fonction de probabilité de densité de Weibull

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp \left[- \left(\frac{v}{c}\right)^k \right]$$
$$f(v) = c^{-k} \cdot v^{(k-1)} \cdot e^{-(v/c)^k}$$

La fonction de probabilité de densité de Weibull est destinée à refléter la probabilité qu'un événement se produise entre deux points. L'aire sous la courbe entre deux vitesses de vent supérieures à zéro sera égale à la probabilité que le vent souffle quelque part entre ces deux vitesses. Sur la courbe de puissance ci-contre, nous pouvons déterminer les constantes des paramètres de Weibull :

k est le **facteur de forme** de Weibull. Il donne la forme de la distribution et prend une valeur comprise entre 1 et 3. Plus la valeur est faible et plus la vitesse du vent est variable tandis-qu'une valeur de k élevée indique une vitesse de vent constante.

c est le **facteur d'échelle** de Weibull exprimé en m/s. Il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. c est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

Dans le cas de la courbe ci-contre :

- paramètre de forme : $k = 1,751311$
- paramètre d'échelle : $c = 5,986052$.

L'aire sous la courbe est définie par :

$$F(v) = 1 - e^{-(v/c)^k}$$

Dans l'exemple ci-contre, la probabilité pour que le vent souffle entre 3 m/s et 4 m/s est de : $F(4) - F(3) = 0,38958 - 0,25788$ soit 13,17%