
Analyse énergétique des centrales électriques

Filière Ingénieur Électronique,
Électrotechnique et Automatique.

Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

L'énergie cinétique du vent peut être exploitée pour produire une force mécanique (moulins à grains, éolienne de pompage) ou produire de l'électricité (l'éolienne est alors aussi appelée aéro-générateur).

Cette dernière application est en plein développement en Europe et dans le monde.



Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

■ DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'APPLICATION

La puissance d'une éolienne varie de quelques dizaines de watts à plus de 2 MW.

L'éolienne standard comporte de nombreux composants nécessaires à l'exploitation du vent, à sa transformation et à l'automatisation de l'installation.

Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

■ DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'APPLICATION

Un aéro-générateur peut être utilisé pour :

- ❑ répondre à une demande d'électricité sur un site non raccordé au réseau de distribution d'électricité;
- ❑ fournir de l'électricité destinée majoritairement à être autoconsommée sur un site raccordé;
- ❑ produire et vendre de l'électricité en intégralité sur le réseau.

Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

■ DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'APPLICATION

Les modalités d'exploitation de l'énergie éolienne sur un site donné s'étudient en plusieurs étapes. Il faut en effet pour cela :

- ❑ connaître le potentiel éolien du site;
- ❑ identifier les données administratives, techniques et environnementales liées à la construction;
- ❑ dimensionner l'installation en fonction des besoins énergétiques du site, du réseau électrique et des objectifs économiques recherchés.

Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

■ DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'APPLICATION

L'application majeure de l'éolien consiste en un groupement de plusieurs éoliennes de fortes puissances, constituant ainsi, une “ferme éolienne” produisant de l'électricité sur le réseau telle une centrale hydroélectrique.

Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

■ DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'APPLICATION

L'engouement pour cette filière découle des multiples orientations internationales. Le protocole de Kyoto, conforté à Johannesburg en août 2002, engage les Etats à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et une directive européenne fixe à 21 % la part d'électricité issue des énergies renouvelables en France d'ici 2010, contre 15 % actuellement.

Centrales éoliennes

QU'EST-CE QUE L'ÉOLIEN ?

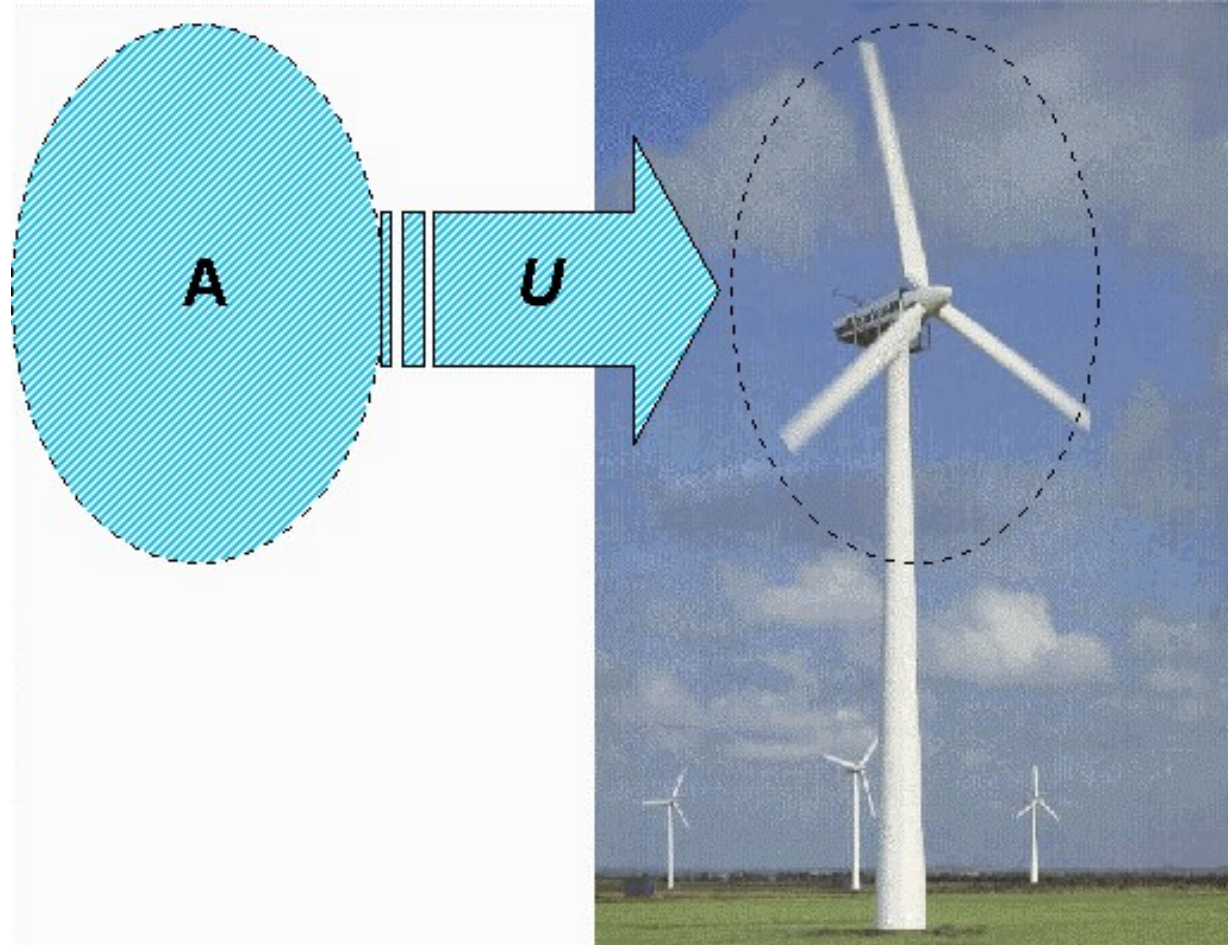
- DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'APPLICATION

Le Maroc, quant à lui, s'est fixé un objectif de 20% en 2020.

Centrales éoliennes

ENERGIE DU VENT

L'énergie du vent ou énergie éolienne traversant une surface A perpendiculaire à la direction du vent est l'énergie d'une masse d'air en mouvement, appelée énergie cinétique.



Centrales éoliennes

ENERGIE DU VENT

A un instant donné, la puissance d'un vent de vitesse U est proportionnelle au cube de la vitesse du vent ainsi qu'à la surface traversée A .

$$P \sim A.U^3$$

Donc, quand la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8.

Centrales éoliennes

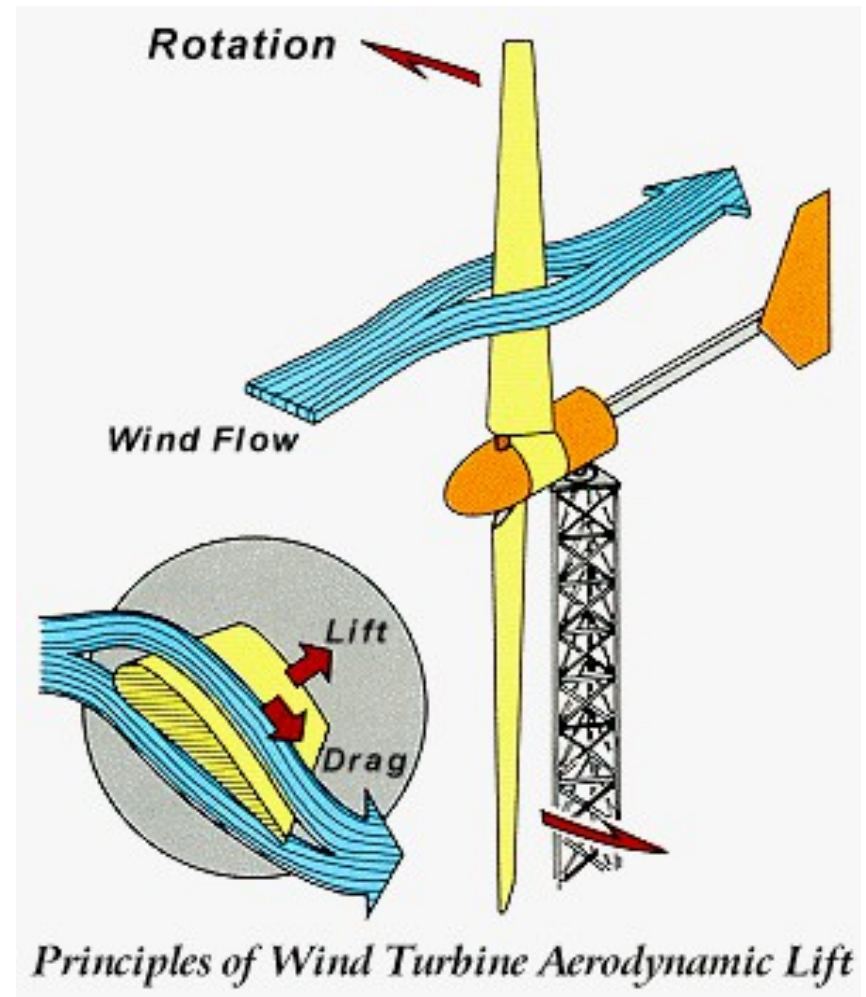
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

Centrales éoliennes

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique avec une pompe, soit en puissance électrique avec une génératrice.



Centrales éoliennes

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

En général, les éoliennes sont équipées de dispositifs annexes permettant de réguler la vitesse de rotation (pour éviter l'**emballement** pendant les périodes de grand vent). Elles disposent aussi d'un dispositif d'orientation qui place en permanence le rotor face au vent, le dispositif le plus simple étant le gouvernail.

Centrales éoliennes

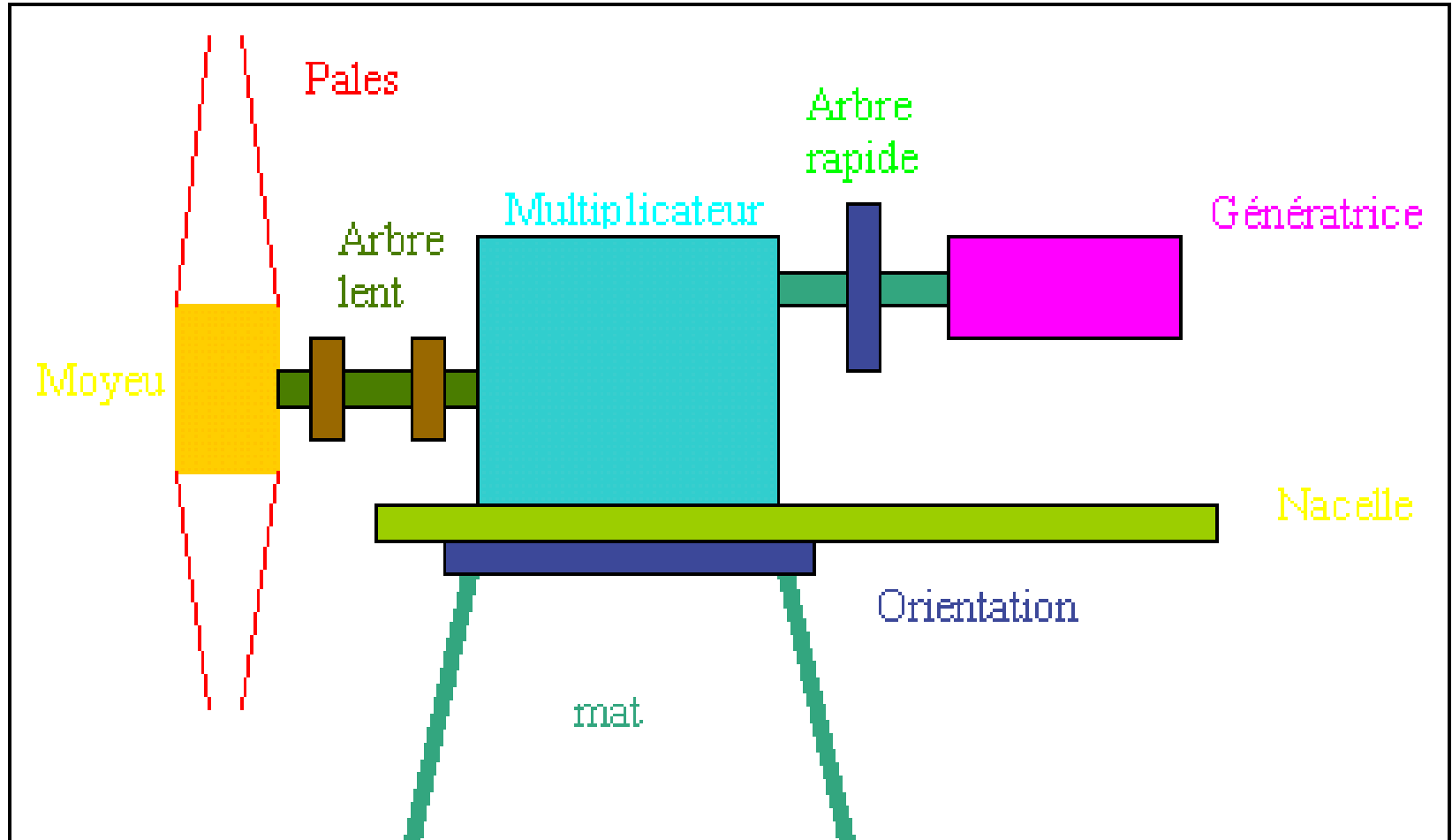
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une éolienne comprend de nombreux composants :

- ❑ le **rotor**, avec des pales montées sur un moyeu ;
- ❑ la **transmission mécanique**, qui transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge ;
- ❑ une **génératrice électrique**, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique ;
- ❑ une **nacelle**, qui supporte le rotor, la transmission et la génératrice ;
- ❑ un **système d'orientation**, qui oriente la nacelle face au vent ;
- ❑ un **mât**, qui supporte la nacelle ;
- ❑ un **système électrique**, qui gère la connexion au réseau et le fonctionnement de l'éolienne

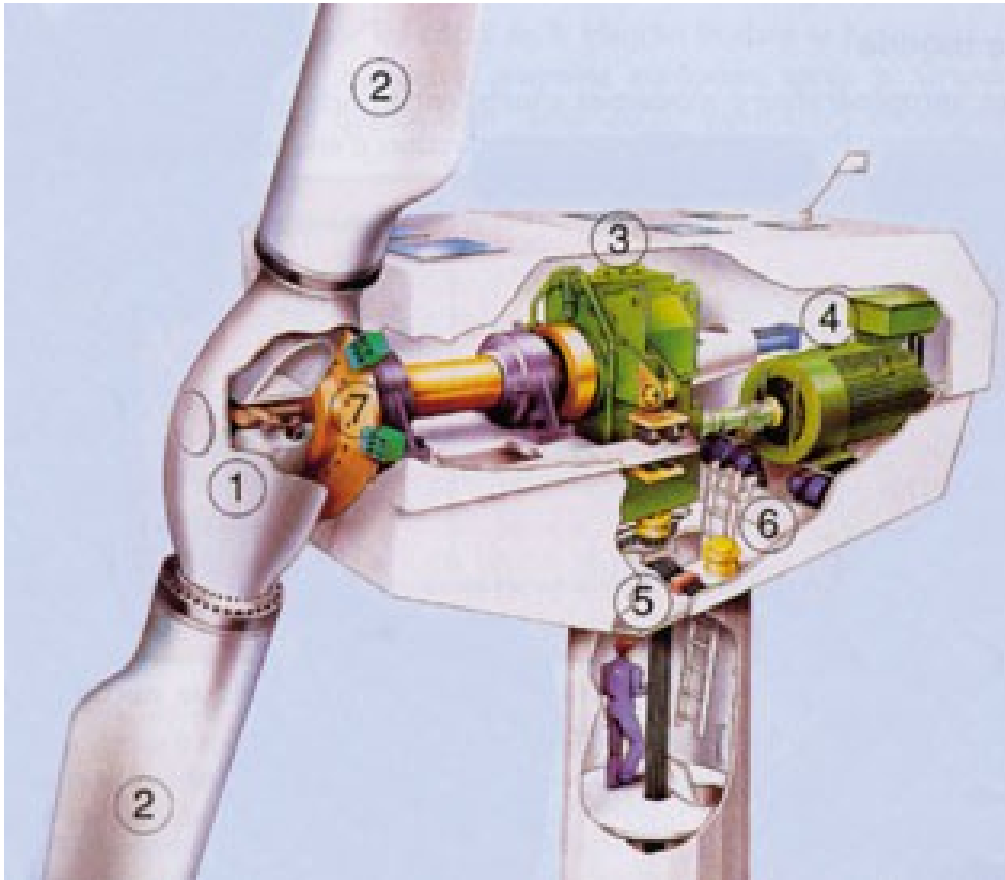
Centrales éoliennes

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



Centrales éoliennes

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



- 1 : Rotor
- 2 : Pales
- 3 : Multiplicateur
- 4 : Génératrice
- 5 : Mécanisme
- 6 : Système hydraulique
- 7 : Frein

Centrales éoliennes

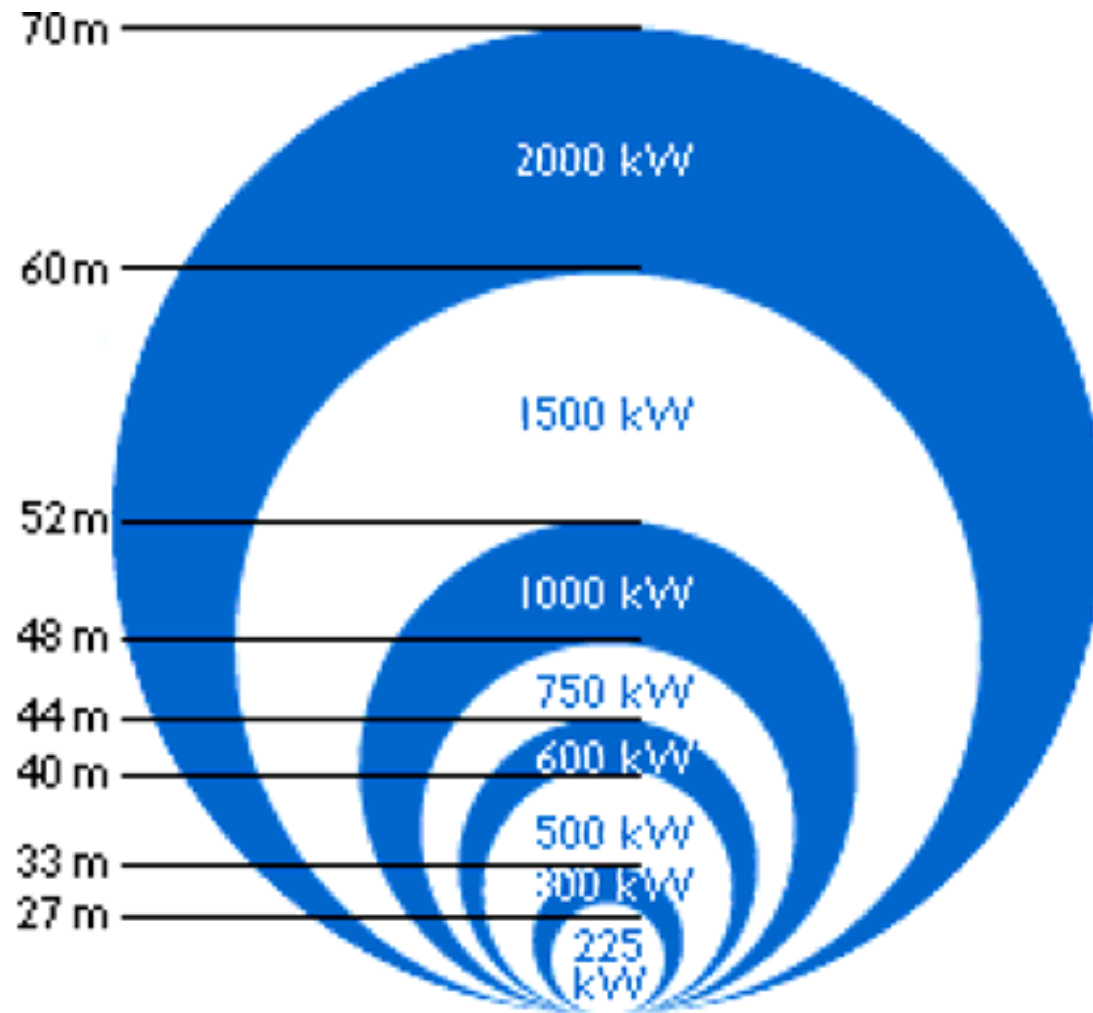
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Toutes les éoliennes commerciales utilisent aujourd'hui ce principe de fonctionnement : elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent.

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante dans un vent donné. La gamme des éoliennes disponible est très large, de 50 watt (diamètre de 90 cm) à 2500 kW et plus (+ de 80 m de diamètre).

Centrales éoliennes

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



Centrales éoliennes

COURBE DE PUISSANCE

Ces puissances sont données pour un vent déterminé, appelé vent nominal, vent pour lequel l'éolienne fournit sa puissance nominale. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance est maintenue constante grâce au dispositif de régulation. Cependant, pour des vitesses de vent trop importantes (tempête), l'éolienne est arrêtée. Une fois arrêtée, l'éolienne peut résister à des vents beaucoup plus importants, jusqu'à 250 km/h ou plus suivant la conception de l'éolienne.

Centrales éoliennes

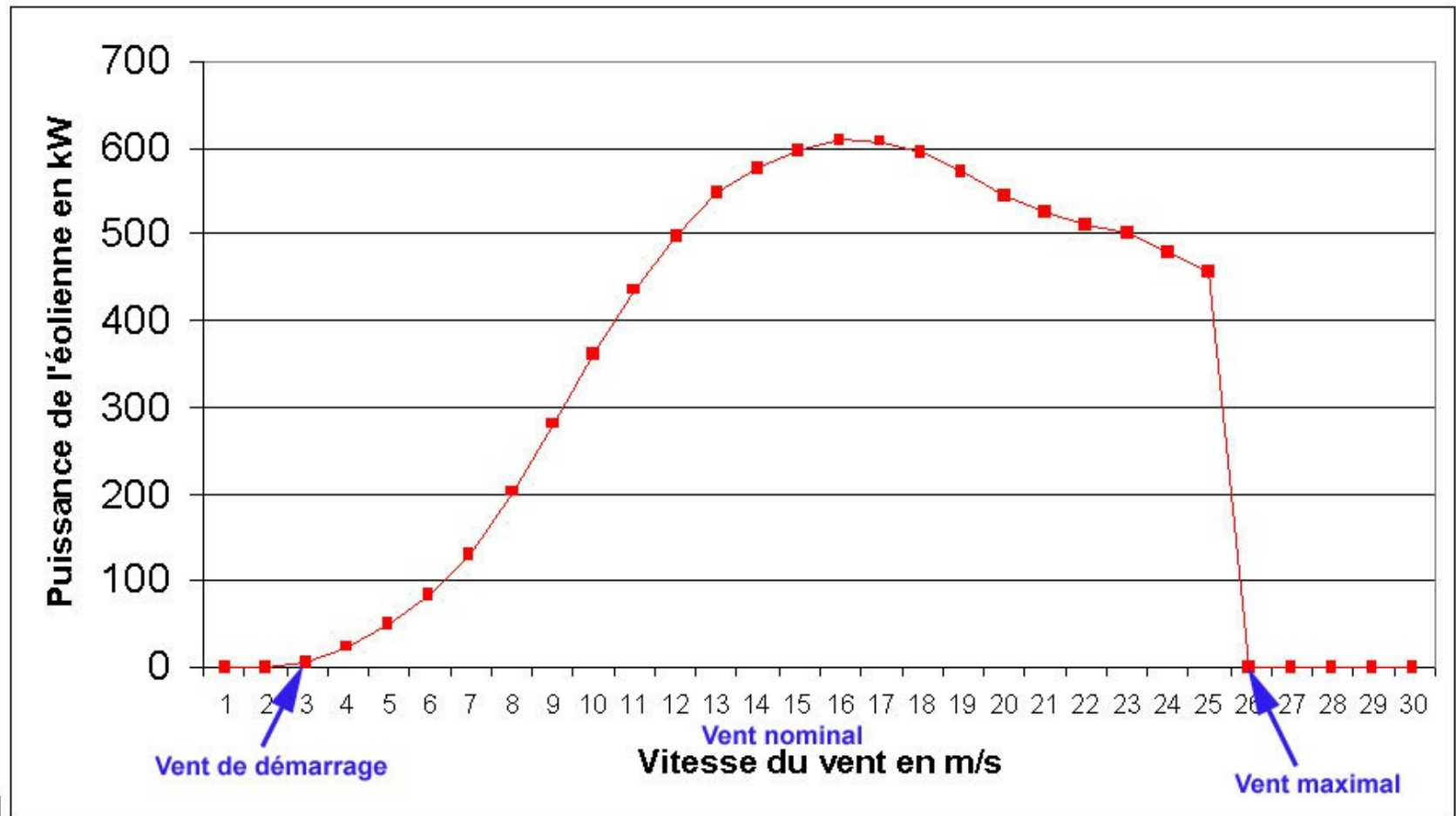
COURBE DE PUISSANCE

Par ailleurs, un vent trop faible ne réussit pas à entraîner le rotor qui ne démarre que pour un vent minimal, appelé vitesse de démarrage (3 ou 4 m/s).

Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance qui donne la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent.

Centrales éoliennes

COURBE DE PUISSANCE



Centrales éoliennes

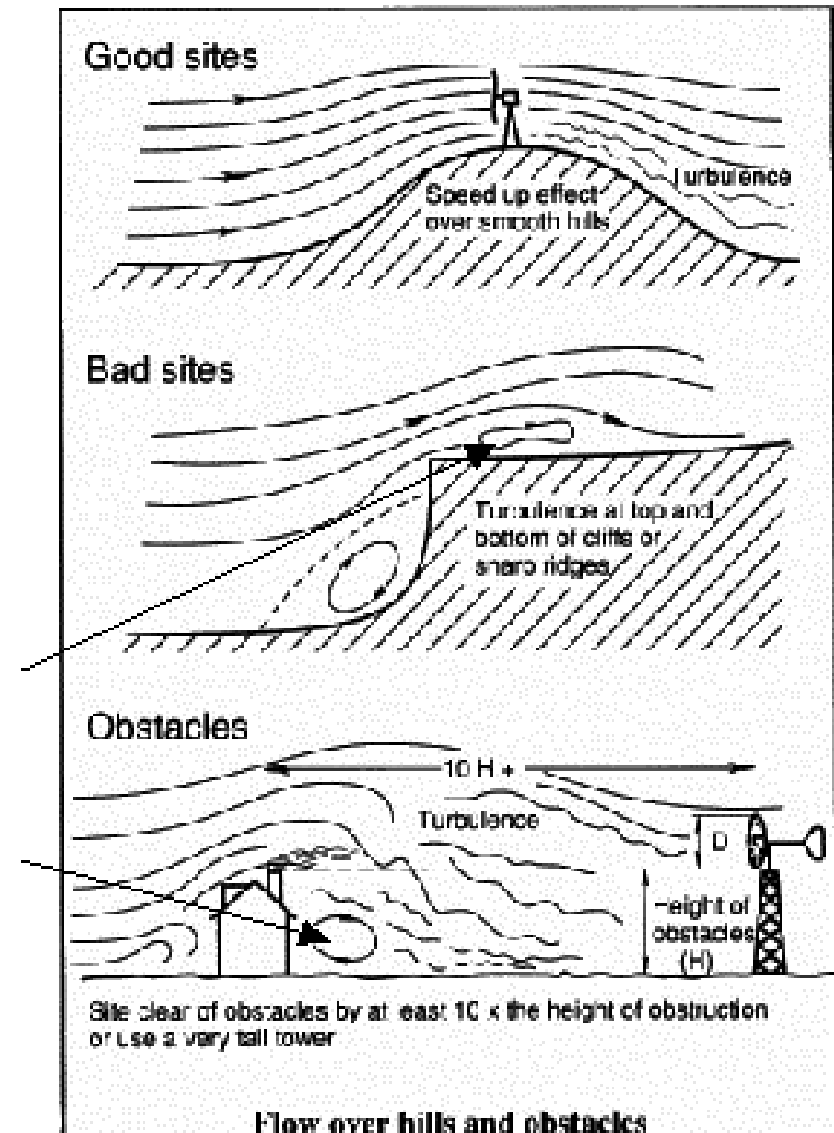
VARIATION AVEC LA HAUTEUR

La vitesse du vent varie avec la hauteur : plus l'on monte, plus le vent est élevé et ceci d'autant plus que le vent est perturbé en surface. Le vent est en effet ralenti par le frottement sur le sol et ce frottement est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural ouvert par exemple.

Centrales éoliennes

OBSTACLE

Quand le vent rencontre un obstacle isolé, il est fortement perturbé sur une distance d'environ 20 fois la hauteur de l'obstacle: dans le sillage de l'obstacle, le vent est plus irrégulier et turbulent et donc de moins bonne qualité.



Centrales éoliennes

OBSTACLE

Ce phénomène arrive aussi quand on place plusieurs éoliennes sur un même site : les éoliennes se gênent les unes les autres si elles ne sont pas suffisamment écartées entre elles (en général, une distance de 6 fois leur diamètre est à respecter entre plusieurs éoliennes).

Centrales éoliennes

QUEL USAGE?

L'énergie produite par une éolienne peut être utilisée de différentes manières :

- ❑ Pour fournir de l'énergie sur un site particulier qu'il s'agisse d'un site raccordé ou non au réseau électrique ;
- ❑ Pour fournir de l'énergie sur le réseau électrique.

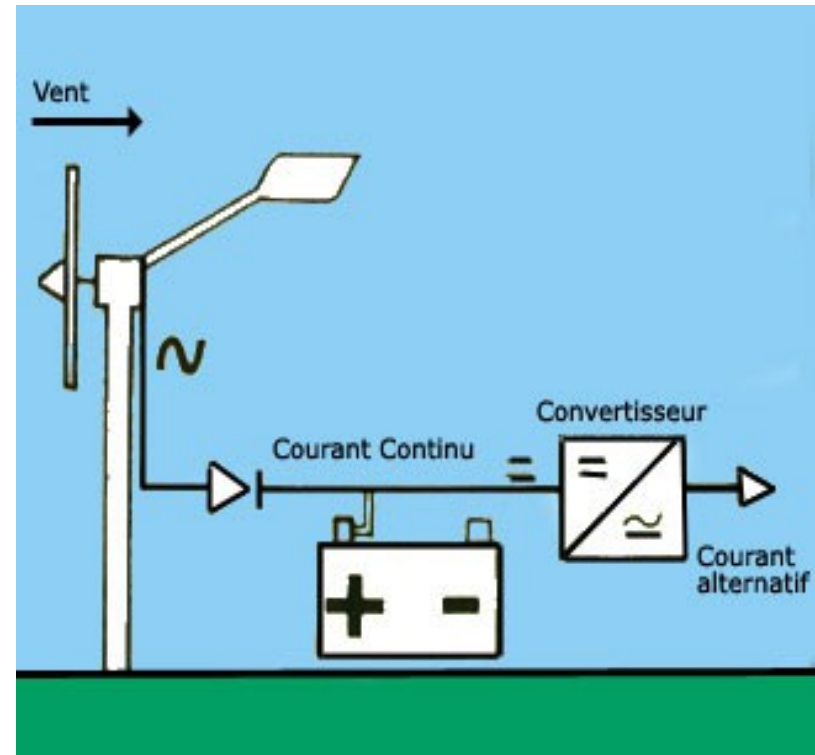
Dans le premier cas, ce qui va déterminer la taille de l'éolienne seront les besoins à fournir sur le site. Dans le second cas, toute l'énergie produite est vendue au réseau électrique : il s'agit d'un producteur autonome.

Centrales éoliennes

QUEL USAGE?

Ensuite deux solutions sont envisageables :

1. L'électricité produite sera stockée dans des batteries (en courant continu) puis utilisée directement avec des appareils électriques spéciaux fonctionnant en courant continu ou bien transformée, via un onduleur (transformateur continu / alternatif), en courant alternatif 220 V identique à celui délivré par le réseau.



Centrales éoliennes

QUEL USAGE?

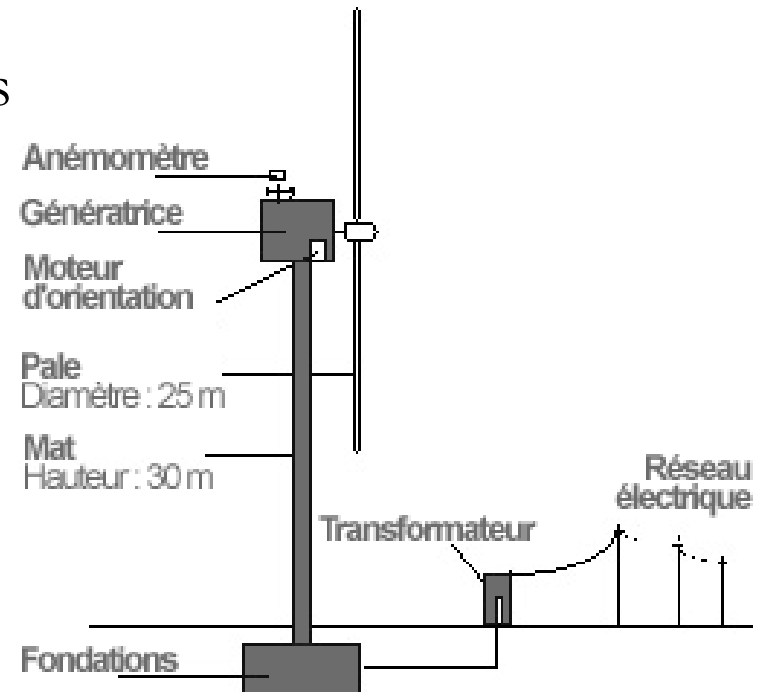
Ensuite deux solutions sont envisageables :

2. L'électricité produite est directement injecté dans le réseau électrique après transformation dans le convertisseur en courant alternatif.

Les parcs éoliens d'une puissance supérieure ou égale à 10 MW se raccordent au réseau haute tension, 63 000 Volts.

Les parcs éoliens d'une puissance inférieure à 10 MW se raccordent au réseau moyenne tension, 20 000

Volts.



Centrales éoliennes

QUEL USAGE?

Les parcs d'aéro-générateurs (ou fermes éoliennes) ont pour but de fournir de l'électricité à l'échelle d'une région ou d'un pays;

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

Principe de base:

Le vent est un phénomène physique naturel qui consiste en un déplacement des molécules d'air. Or, chaque corps en déplacement a emmagasiné de l'énergie cinétique. Le principe de l'hélice d'une éolienne est justement de capter cette énergie contenue par le vent.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Le vent muni d'énergie cinétique peut la transmettre à tout objet avec lequel il entre en contact. A titre d'exemple on prend les tempêtes qui déracinent les arbres, ou tout simplement des morceaux de papier volant au vent, ces phénomènes ne sont pas innés, c'est le vent qui transmet son énergie au corps en contact.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Un corps faisant obstruction au vent capte donc son énergie cinétique mais aussi il est à l'origine d'une dépression occasionnée par sa masse, ce qui entraîne une perturbation.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Ce qui nous intéressera, c'est la surpression devant l'obstacle car elle est à l'origine du mouvement de l'hélice de l'éolienne.

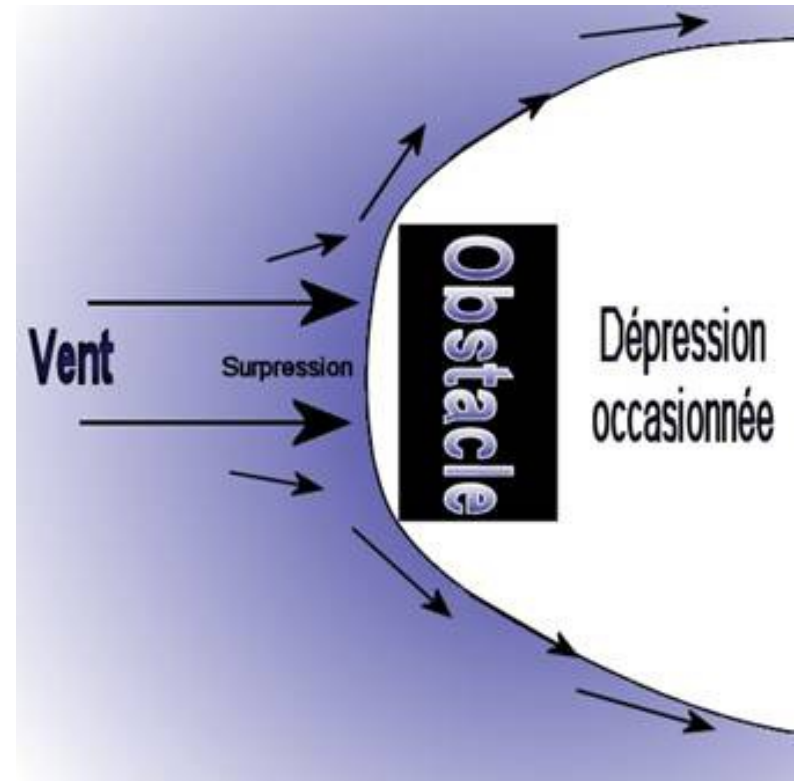
L'endroit de la surpression sur l'obstacle est aussi l'endroit où le transfert d'énergie cinétique est le plus important.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Le vent a une direction et un sens, le transfère d'énergie en subit donc les conséquences, si l'obstacle au vent est une surface plane, alors les tendances de l'obstacle auront la direction de la perpendiculaire à cette surface et le sens du vent.

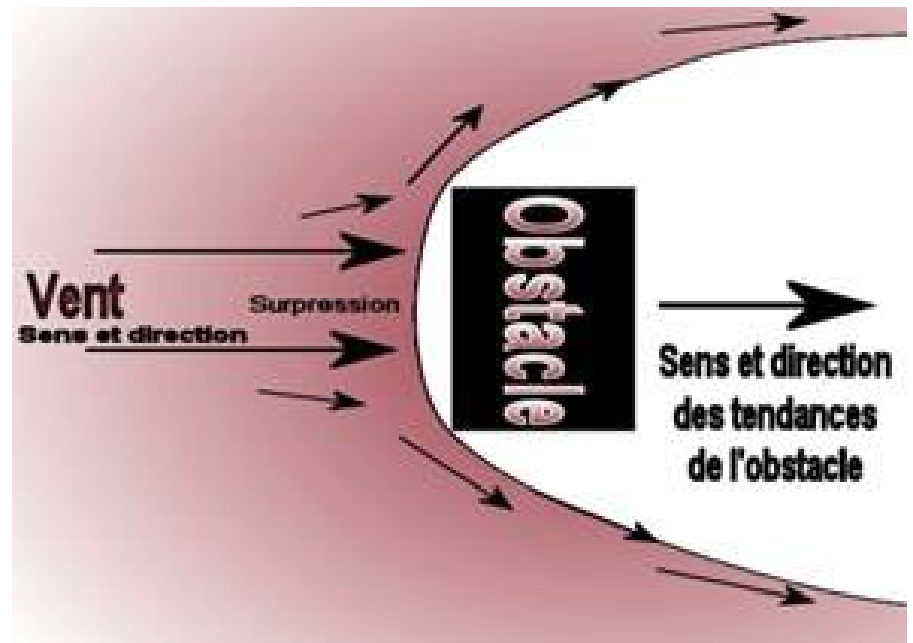


Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Après ce transfert, l'obstacle au vent est comme poussé par le vent et a tendance à aller dans son sens. C'est le résultat du transfert d'énergie cinétique du vent.



Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

L'obstacle au vent absorbe l'énergie cinétique du vent. Mais la question se pose, jusqu'à quel stade pourra-t-on extraire l'énergie du vent ? Nous arrivons à la loi de Betz :

Plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus remarquable sera le ralentissement du vent sortant de l'éolienne.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Si l'on tente d'extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à une vitesse nulle, ce qui, en réalité, signifierait qu'il n'arriverait pas à abandonner le rotor.

Le résultat serait dans ce cas tout le contraire de ce qu'on aurait cherché à obtenir : aucune énergie ne serait extraite du vent, l'entrée de l'air dans le rotor étant évidemment également empêchée.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

L'autre cas extrême serait que le vent passerait à travers le système sans perturbation, mais avec le même résultat : l'énergie extraite serait absolument nulle.

On peut donc assumer qu'il doit y avoir une manière de freiner le vent qui se trouve entre ces deux extrémités et qui permette de façon bien plus efficace de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

Il y a en fait une réponse très simple à cette question : une éolienne idéale freinerait le vent à $1/3$ de sa vitesse originale.

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

- L'énergie cinétique de l'air se déplaçant à une vitesse v est donnée par:

$$E = 1/2.mv^2$$

- La puissance est donnée par:

$$P = dE/dt$$

C'est la masse de l'air qui varie, donc on a:

$$P = 1/2 v^2.(dm/dt)=1/2 v^2 (\rho.S.dl/dt)$$

S est la surface balayée par le rotor.

~~ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3).~~

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

- La puissance est donnée par:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (dl/dt) = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

Nota: v étant la vitesse du vent avant d'atteindre l'hélice de l'éolienne, on la notera v_1 .

- L'énergie extraite du vent par l'hélice provoque une diminution de sa vitesse qui devient v_2 en aval de l'hélice.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

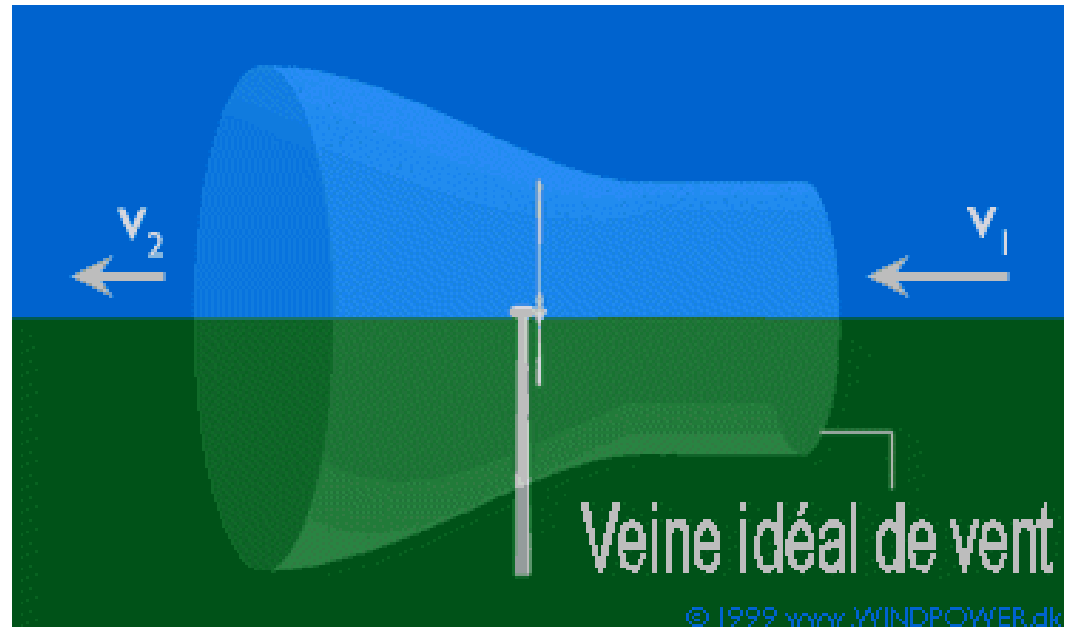
D'où:

$$E_{\text{amont}} = 1/2 \cdot m \cdot v_1^2$$

$$E_{\text{aval}} = 1/2 \cdot m \cdot v_2^2$$

La puissance récupérée par l'éolienne est alors:

$$E = E_{\text{amont}} - E_{\text{aval}}$$



Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

■ On a donc:

$$E = 1/2 \cdot m(v_1^2 - v_2^2)$$

La puissance extraite est alors:

$$\begin{aligned} P_e &= dE/dt = 1/2 \cdot (dm/dt) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \\ &= 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_e \cdot (v_1^2 - v_2^2) \end{aligned}$$

où v_e est la vitesse de l'air au niveau de l'hélice.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

■ v_e est considérée par Betz comme étant la vitesse moyenne des vitesses amont et aval, soit:

$$v_e = (v_1 + v_2)/2$$

Et par conséquent:

$$\begin{aligned} P_e &= 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)/2 \\ &= 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot (1 - v_2^2/v_1^2) \cdot (1 + v_2/v_1)/2 \end{aligned}$$

Le terme $1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3$ représente la puissance amont du vent, qu'on peut noter P_0 .

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

■ On écrit donc:

$$P_e = P_0 \cdot (1 - x^2) \cdot (1 + x) / 2$$

Avec :

P_e : la puissance extraite par l'éolienne;

P_0 : la puissance initiale, en amont de l'éolienne;

x : le rapport v_2/v_1 des vitesses du vent amont et aval.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

■ On écrit donc:

$$P_e = P_0 \cdot (1 - x^2) \cdot (1 + x) / 2$$

L'étude d'une telle fonctionne donne bien un maximum pour $x = 1/3$, soit $v_2 = v_1/3$

A ce maximum correspond une puissance extraite :

$$P_e = 16/27 \cdot P_0$$

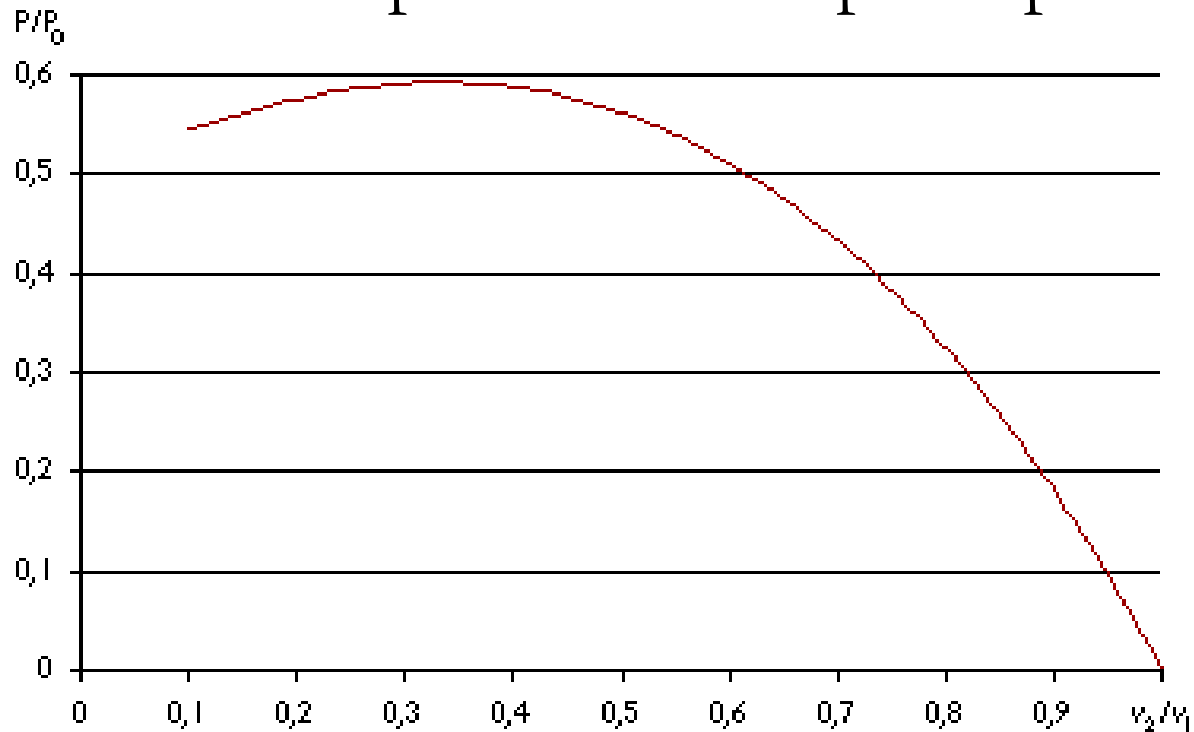
soit 59% de la puissance disponible du vent.

Centrales éoliennes

PUISSANCE RECUPEREE PAR UNE EOLIENNE

L'énergie du vent

- Variation de la puissance récupérée par l'éolienne



© 1999 Søren Krohn

Centrales éoliennes

AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Avantages

- Les grandes éoliennes (offshore) peuvent concurrencer à moindre coût l'énergie produite par le nucléaire;
- Énergie renouvelable et gratuite;
- Énergie modulable, adapté au capital disponible et aux besoins en énergie (des aéro-générateurs de toutes puissances existent.);
- Grande fiabilité et frais de fonctionnement limités;

Centrales éoliennes

AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Avantages

- Installation (et donc démontage aussi) très rapide et relativement simple;
- La période de haute productivité se situe en hiver (vents plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte;
- Projets subventionnés par la commission Européenne ainsi que par d'autres organismes.

Centrales éoliennes

AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Inconvénients

- L'énergie éolienne est plus chère que l'électricité. Une petite éolienne n'est pas rentable dans les pays développés;
- Lorsque la production dépasse la consommation le stockage est encore onéreux. Mais en cas de raccordement au réseau électrique, 100% de l'énergie éolienne est utilisée et le stockage n'est pas nécessaire;

Centrales éoliennes

AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Inconvénients

- Effets sur le paysage : les turbines ont une présence verticale frappante dans le paysage. Il convient donc de prendre soigneusement en compte l'emplacement, la couleur et la forme des aéro-générateurs (d'où l'intérêt de l'offshore);
- Le bruit est considéré comme négligeable (comme le vent dans les feuilles d'un arbre) si les habitations sont situées à plus de 300 m;

Centrales éoliennes

AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Inconvénients

- Les éoliennes sont encore un investissement important;
- Les démarches administratives sont très lourdes pour l'installation des grandes éoliennes.