

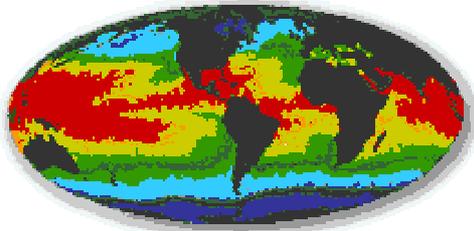
Energie Eolienne

D'où vient l'énergie éolienne ?

Tout comme l'[énergie](#) qui se trouve dans les combustibles fossiles, les énergies renouvelables (sauf les énergies marémotrice et géothermique) sont dérivées de l'énergie solaire. En effet, le soleil envoie chaque heure quelque 174.423.000.000.000 kilowattheures d'énergie à notre planète. La terre reçoit, en d'autres termes, une [puissance](#) équivalente à $1,74 \times 10^{17} \text{ W}^1$.

Environ un à deux pour cent de l'énergie émise par le soleil est convertie en énergie éolienne. C'est entre 50 et 100 fois plus que l'énergie transformée en biomasse par l'ensemble des végétaux de la terre.²

Les flux d'air sont produits par la variation des températures



© 1998 www.WINDPOWER.org

Le soleil réchauffe les régions situées autour de l'équateur, à latitude 0, bien plus qu'il ne réchauffe les autres parties du globe. Sur la photo infrarouge des températures de la surface de la mer (prise en juillet 1984 par un des satellites de NASA, NOAA-7), les régions chaudes sont marquées en rouge, orange et jaune.

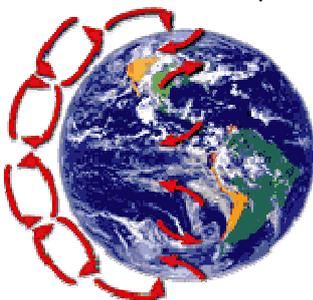
Ayant une densité plus faible que l'air froid, l'air chaud s'élève jusqu'à une altitude d'environ 10 km. Ensuite il s'étend vers le nord et le sud. Si la terre ne tournait pas, les courants d'air iraient jusqu'aux pôles Nord et Sud avant de redescendre (suite au refroidissement) et de retourner à l'équateur.

La force de Coriolis

A cause de la rotation de la terre, tout mouvement dans l'hémisphère Nord semblera se dévier vers la droite, si nous l'observons depuis la terre (dans l'hémisphère Sud les mouvements sont déviés vers la gauche). On appelle cette force de déviation la force de Coriolis (d'après le mathématicien français Gustave Gaspard Coriolis, 1792 - 1843).

Ci-dessous nous voyons la même vue prise par une caméra fixée à la terre.

Ci-dessous nous voyons la même vue prise par une caméra fixée dans l'espace extra-atmosphérique.



© 1998 www.WINDPOWER.org

La force de Coriolis est un phénomène visible. Les rails, par exemple, s'usent plus rapidement d'un côté que de l'autre, tout comme le lit d'une rivière se creuse plus dans l'un côté que dans l'autre (lequel dépend de l'hémisphère dans lequel il se trouve : dans l'hémisphère Nord, les particules en mouvement sont déviées vers la droite).

Dans l'hémisphère Nord, les vents tendent à souffler dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'ils s'approchent d'une zone de basse pression.

Dans l'hémisphère Sud, en revanche, ils tendent à tourner dans le sens des

¹) La puissance émise par le soleil est de $1,37 \text{ kW/m}^2$ sur la surface de la sphère qui a pour centre le soleil et pour rayon le rayon moyen du trajectoire de la terre. Cette puissance se répartit sur un disque circulaire d'une surface de $1,27 \times 10^{14} \text{ m}^2$. La puissance émise à la terre est donc de $1,74 \times 10^{17} \text{ W}$.

² En moyenne, la production primaire nette des plantes se situe autour de $4,95 \times 10^6$ calories par mètre carré par an. C'est ce que l'on appelle la production primaire nette (PPN), c.-à.d. la quantité d'énergie accessible à tous les maillons suivants de la chaîne alimentaire/énergétique. La surface de la terre est de $5,09 \times 10^{14} \text{ m}^2$. La puissance nette stockée par les plantes est donc de $1,91 \times 10^{13} \text{ W}$, équivalent à 0,011 % de la puissance émise à la terre. Vous trouverez le facteur de conversion entre les deux unités énergétiques Calories et Joule dans le [manuel de référence](http://www.windpower.org/fr/stat/units.htm) de ce site. <http://www.windpower.org/fr/stat/units.htm>

aiguilles d'une montre autour d'une dépression.

A la page suivante, nous verrons de quelle manière la force de Coriolis influe sur les directions du vent.

Ressources éoliennes : les vents globaux

La force de Coriolis influe sur les vents globaux

L'air s'élève à l'équateur, s'étendant vers le nord et le sud dans la haute atmosphère. Dans les deux hémisphères, à approximativement 30 degrés de latitude, la [force de Coriolis](#) empêche les courants d'air d'aller beaucoup plus loin. L'air commençant de redescendre à cette latitude, il se crée ici une zone de haute pression (appelée aussi un anticyclone).

Lorsque l'air s'élève à l'équateur, il se crée au niveau du sol une zone de basse pression attirant des masses d'air du nord et du sud.

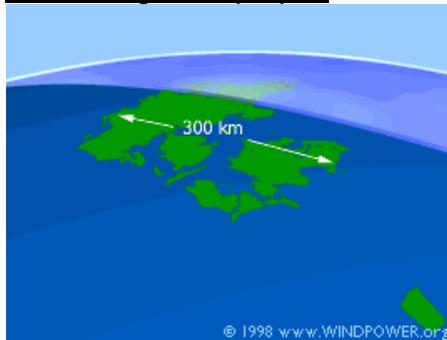
Aux deux pôles, des anticyclones se produisent suite au refroidissement de l'air. Retenant la force de Coriolis, nous pouvons donc établir les directions suivantes du vent :

Les directions dominantes du vent

Latitude	90-60°N	60-30°N	30-0°N	0-30°S	30-60°S	60-90°S
Directions	NE	SO	NE	SE	NO	SE

Sur l'image ci-dessus, l'épaisseur de l'atmosphère est très exagérée. En réalité, l'atmosphère n'est épaisse que de 10 km ce qui correspond à 1/1200ième du diamètre de la Terre. On appelle cette partie de l'atmosphère la troposphère. C'est dans cette couche que se produisent tous les phénomènes météorologiques ainsi que le fameux effet de serre. La détermination des directions du vent joue un rôle important lors de l'installation d'éoliennes étant donné qu'il doit y avoir aussi peu d'[obstacles](#) que possible dans la direction dominante. Cependant, la géographie locale peut influencer sur les résultats généraux indiqués dans le tableau ci-dessus, ce que nous allons étudier plus en détail dans les pages suivantes.

Les vents géostrophiques



L'atmosphère (la troposphère)

C'est dans l'atmosphère entourant la Terre, appelée aussi la troposphère, que se produisent les phénomènes météorologiques ainsi que l'effet de serre.

Comparée au diamètre de la Terre de quelque 12.000 km, la troposphère est une couche très mince n'atteignant qu'environ 11 km.

Sur l'image, vous voyez l'épaisseur approximative de la troposphère par rapport à une distance de 300 km correspondant

à la distance de l'est à l'ouest du Danemark. Autre exemple illustratif : si notre globe était une balle d'un diamètre de 1,2 m, l'épaisseur de l'atmosphère ne serait que de 1 mm.

On appelle aussi les [vents globaux](#) que nous venons d'étudier dans les pages précédentes les vents géostrophiques. Ceux-ci sont avant tout le produit d'écart de température et des variations de pression qui en suivent. Aussi la surface du sol n'influe-t-elle que peu sur la direction et la vitesse de ces vents. On les trouve à des hauteurs supérieures à 1.000 m au-dessus du niveau du sol. Leurs vitesses peuvent être mesurées en utilisant des ballons-sondes.

Les vents de surface

Jusqu'à environ 100 m de hauteur, l'influence de la surface du sol sur les vents est importante. Ainsi, comme nous allons voir par la suite, la [rugosité](#) du terrain ainsi que les [obstacles](#) naturels ou artificiels peuvent freiner le vent. A cause de la rotation de la terre, les directions des vents près de la surface diffèrent également un peu de celles des vents géostrophiques (cf. la [force de Coriolis](#)).

En matière d'énergie éolienne, ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt.

Vents locaux: les brises de mer

Malgré le rôle important que jouent les [vents globaux](#) dans la détermination des vents dominants sur un site donné, la climatologie locale peut également influencer.

Comme les vents locaux sont toujours superposés au système des vents dominants, la direction du vent est déterminée par la somme d'influences globales et locales. Ainsi, lorsque les vents globaux sont faibles, les vents locaux tendent à dominer le régime des vents.



Les brises de mer

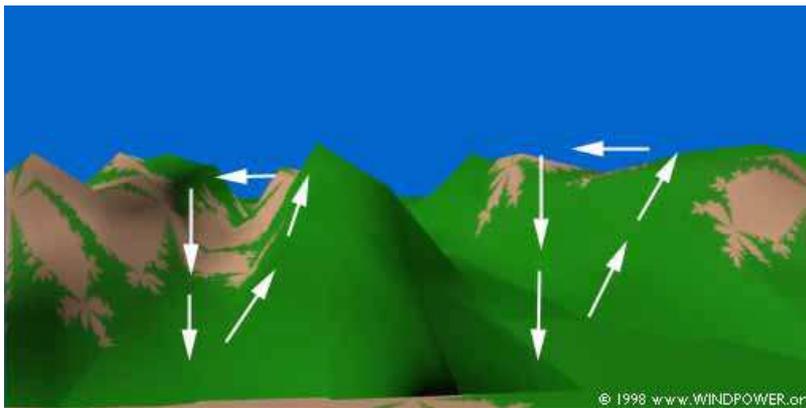
En cours de journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. Ainsi, une dépression se crée près de la surface de la terre, attirant l'air froid provenant de la mer. On parle alors d'une brise de mer.

Au crépuscule, il se produit souvent une période calme, les températures sur terre et sur mer étant plus au moins égales.

La nuit venue, le vent commence à souffler dans le sens inverse. En général, la vitesse de cette brise de terre est moins forte que celle de la brise de mer étant donné que la différence de température entre la terre et la mer est moins importante la nuit.

La mousson qui souffle en Asie du Sud-Est est en effet une brise de mer alternant avec une brise de terre à grande échelle, sa direction variant en fonction des saisons, et se produisant parce que la terre se réchauffe ou se refroidit beaucoup plus vite que la mer.

Les vents de montagne

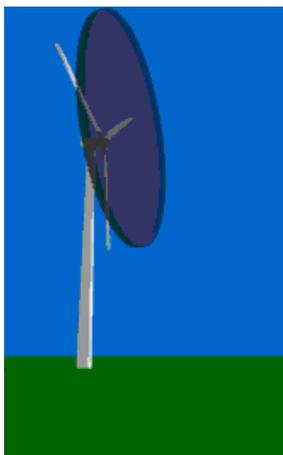


Les régions montagneuses donnent naissance à beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. La brise de vallée en est un exemple. Elle se produit sur les versants exposés au sud dans l'hémisphère Nord (au nord dans l'hémisphère Sud). Le réchauffement des versants et de l'air avoisinant font tomber la [densité de l'air](#). En conséquence,

l'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne, produisant ce que l'on appelle une brise montante. La nuit, le phénomène s'inverse et une brise descendante se produit.

Si le creux d'une vallée est en pente, on peut observer l'effet dit de canyon, les vents montant et descendant le long des versants qui entourent la vallée.

Les vents s'écoulant le long des versants des montagnes peuvent être très violents. Comme exemple, on peut citer le phénomène de Foehn que l'on trouve dans les Alpes, ainsi que les effets de Chinook et de Zonda se produisant dans les Montagnes Rocheuses en Amérique du Nord et dans les Andes en Amérique du Sud, respectivement.



D'autres exemples de systèmes de vents locaux sont le Mistral qui pénètre dans la vallée du Rhône pour s'étendre ensuite vers la mer Méditerranée, et le Sirocco soufflant du Sud de Sahara vers la Méditerranée.

L'énergie du vent: la densité de l'air et la surface balayée par le rotor

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:

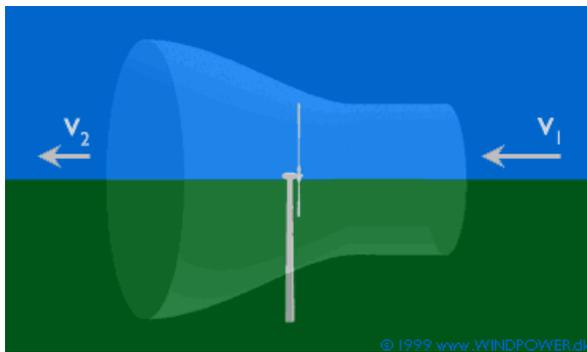
La densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. La figure à gauche montre ce qui se passe lorsqu'un disque cylindrique d'air, d'un mètre d'épaisseur, traverse la surface de 2.300 m² balayée par le rotor d'une éolienne typique de 1.000 kW. Si le diamètre du rotor est égal à 54 m, un tel disque pèsera en effet 2,8 tonnes, soit 2.300 x 1,225 kg. La densité de l'air

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la [densité de l'air](#), c.-à.-d. la masse de l'air par unité de volume. Autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne. Ainsi, la surface balayée par le rotor d'une éolienne typique de 1.000 kW est de quelque 2.300 m², le diamètre du rotor étant d'environ 54 m. L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor.

Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de quatre fois plus d'énergie.



Les éoliennes détournent le vent.

En fait, l'image précédente est simplifiée. En réalité, une éolienne dévie le vent même avant que celui-ci atteigne la surface balayée par le rotor. Il en résulte qu'une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale transportée par le vent. Nous examinerons ce sujet plus en détail au § sur la [loi de Betz](#).

Sur l'image ci-dessus, le vent souffle depuis la droite, et nous utilisons un dispositif quelconque afin de capter l'énergie cinétique contenue dans le vent (dans ce cas, nous avons employé un rotor tripale, mais nous

aurions aussi bien pu utiliser un autre dispositif mécanique).

Le tube de courant

Une éolienne freine obligatoirement le vent lorsqu'elle capte son énergie cinétique et la convertit en énergie rotative. Pour cette raison, la vitesse du vent à l'avant du rotor (à droite) est toujours supérieure à celle à l'arrière (à gauche).

Comme la masse d'air traversant la surface balayée par le rotor (par seconde) est égale à celle sortant à gauche, la veine d'air s'élargit forcément à l'arrière du rotor, ce que nous avons essayé d'illustrer sur l'image ci-dessus en dessinant autour du rotor un tube imaginaire, appelé aussi un tube de courant. Le vent ne sera pas freiné à sa vitesse finale juste après avoir traversé l'hélice - le freinage aura lieu progressivement jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

La distribution de la pression atmosphérique à l'avant et à l'arrière du rotor



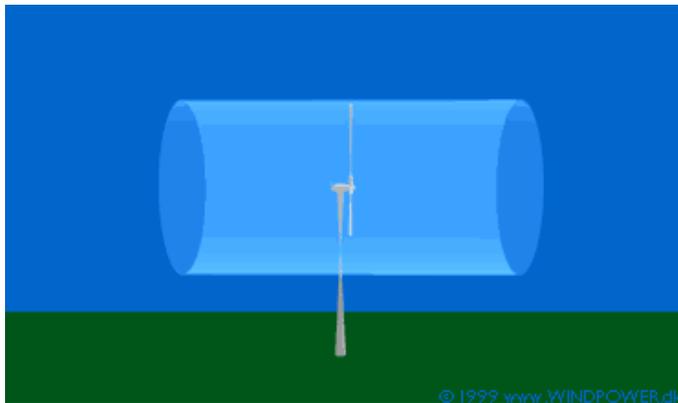
Le graphe à gauche montre la pression atmosphérique tracée verticalement tandis que l'axe horizontal indique la distance au rotor.

Le vent souffle de droite et le rotor se trouve au milieu.

Lorsque l'air s'approche du rotor, la pression atmosphérique augmente, le rotor constituant un obstacle au vent. La pression atmosphérique diminue de façon très importante juste à l'arrière du rotor (à gauche). Elle commence ensuite à augmenter progressivement jusqu'à atteindre le niveau de pression atmosphérique normal.

Que se passe-t-il plus en aval?

Plus en aval, la [turbulence](#) assure que le vent en déplacement lent à l'arrière du rotor est mélangé avec le vent en écoulement libre de la zone ambiante. Par conséquent, plus nous nous éloignons de l'éolienne, plus l'[effet d'abri](#) diminue. Ce sujet est abordé au § traitant de l'[effet de parc](#).



Pourquoi pas un tube de courant cylindrique? Peut-être serez-vous tenté de faire remarquer que le rotor tournerait sans doute également, si l'on plaçait l'éolienne dans un tube cylindrique normale comme nous l'avons fait sur l'image ci-dessous. Pourquoi affirmons-nous alors que le tube de courant a la forme d'une bouteille? Il est évidemment vrai qu'un rotor placé dans un tube comme celui ci-dessus pourrait toujours tourner, mais essayons de voir de plus près ce qui se passerait le cas échéant.

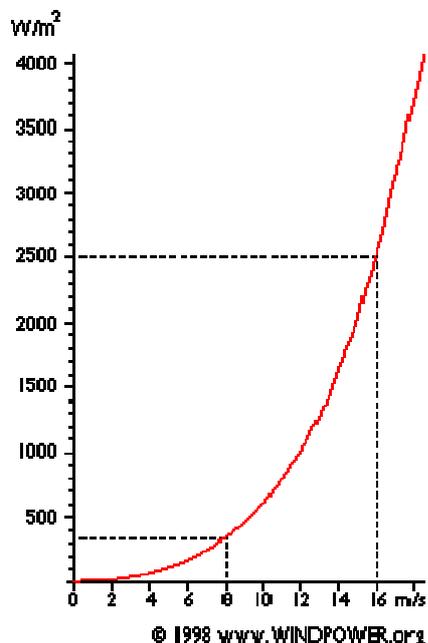
Le vent à gauche du rotor se déplace à une vitesse moins élevée que celui à droite arrivant au rotor. Ayant déjà appris que la masse d'air entrant dans le tube chaque seconde est égale à celle qui sort à gauche, nous pouvons déduire que l'emplacement dans le tube d'un obstacle au vent (dans ce cas un rotor) entraînerait forcément une distorsion d'une partie de l'air arrivant dans le tube. Si le tube de courant autour du rotor était cylindrique, la haute pression dans la partie droite du tube empêcherait donc le passage d'une partie de la masse d'air.

Il s'en suit que c'est le tube en forme de bouteille qui donne l'impression correcte de ce qui arrive au vent lorsqu'il rencontre une éolienne.

L'énergie du vent: la vitesse du vent au cube

La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent. L'énergie transportée par le vent varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent. Ainsi, un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de 2^3 , soit $2 \times 2 \times 2 = 8$ fois.

Mais comment se fait-il que la capacité énergétique du vent varie avec le cube de sa vitesse? Prenons un exemple illustratif: vous avez peut-être déjà remarqué que si vous doublez la vitesse d'une voiture, il faudra quatre fois plus d'énergie pour l'arrêter (la seconde loi de Newton).



En effet, une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Un doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage de deux fois plus de disques d'air à travers le rotor par seconde, chaque disque transportant, comme nous venons de l'apprendre en étudiant l'exemple de la voiture, quatre fois plus d'énergie.

Le graphe à droite montre que, à une vitesse de vent de 8 m/s, la puissance (quantité d'énergie par seconde) sera de 314 Watt par mètre carré, si le vent souffle d'une direction perpendiculaire à la surface balayée par le rotor.

A 16 m/s, nous obtiendrons une puissance augmentée de 8 fois, soit 2.509 W/m². Le tableau figurant dans le manuel de référence montre la capacité énergétique du vent par mètre carré en fonction de la vitesse.

La puissance du vent traversant perpendiculairement une surface circulaire est égale à:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2$$

Où P est la puissance du vent mesurée en W

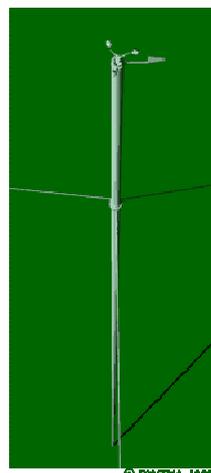
ρ la densité de l'air sec = 1,225 en kg/m³ (à 15° C et à pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer,) v = la vitesse du vent mesurée en m/s r = le rayon du rotor mesuré en m

La mesure de la vitesse du vent: les anémomètres



La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles comme celui de l'image de gauche. Un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse de rotation est enregistrée électroniquement.

En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent. Au lieu de coupelles, l'anémomètre peut être muni d'une hélice, c'est cependant assez rare. D'autres types d'anémomètres sont les anémomètres à ultrasons ou à laser qui enregistrent les changements de phase du son ou de la lumière réfléchis par les molécules de l'air. Les anémomètres à fil chaud (ou thermiques) enregistrent la vitesse du vent en comparant chaque minute les écarts de température existant entre les fils chauds placés du côté du vent et ceux placés du côté sous le vent. Plus le vent est fort, plus le fil chaud sous le vent se refroidit. L'avantage principal de l'emploi d'anémomètres non-mécaniques est une réduction de la sensibilité au gel. Dans la pratique, l'anémomètre à coupelles s'utilise cependant partout - ainsi, des modèles spéciaux munis d'arbres et de coupelles chauffés ont été conçus pour les régions arctiques. Des anémomètres de qualité sont une nécessité impérieuse pour obtenir des mesures fiables. Les modèles d'entrée de gamme ne sont pas du tout appropriés aux mesures que réalise l'industrie éolienne avant l'installation d'une éolienne. Ne pas oublier que la puissance dépend du cube de la vitesse du vent. Il est possible d'acheter pour environ 700 à 900 € un anémomètre professionnel et bien calibré avec une erreur de mesure de seulement 1 %. Ce montant est négligeable comparé au risque potentiel de faire une erreur de mesure du point de vue économique.



La mesure de la ressource éolienne sur un site potentiel se réalise le plus souvent par l'installation d'un anémomètre en haut d'un mât dont la hauteur correspond à la hauteur du moyeu de l'éolienne prévue. De cette façon, on évite l'insécurité liée à l'estimation de la vitesse du vent à une hauteur donnée à partir de mesures faites à une hauteur différente.

L'installation de l'anémomètre en haut du mât réduit au minimum le risque de perturbations de l'écoulement de l'air causées par le mât lui-même. En cas d'installation de l'anémomètre sur un des côtés du mât, il est donc très important qu'il soit placé dans la [direction dominante du vent](#) afin de minimiser l'effet d'abri créé par le mât.

Quel mât utiliser?

Les mâts haubanés, minces et cylindriques sont en général mieux appropriés à l'installation d'instruments de mesure que les mâts en treillis qui produisent, eux, un plus grand effet d'abri.

Les mâts se vendent en kits et sont faciles à assembler. De plus, il est normalement possible d'ériger un tel mât sur un site potentiel sans avoir à utiliser une grue ou d'autres sortes d'équipement lourd. Le coût d'un anémomètre, d'un mât et d'un enregistreur de données (voir la description ci-dessous) s'élève à environ 5000€ au total.

Enregistrement de données

Une mémoire située dans un petit ordinateur enregistre les données sur les vitesses et les directions du vent. Cet ordinateur, appelé aussi un enregistreur de données (data logger en anglais), peut fonctionner sur pile pendant une période assez longue. La photo ci-contre montre un tel enregistreur. Environ une fois par mois, il faut changer la mémoire (à moins de faire un télérelevé)

Conditions arctiques

Dans les régions montagneuses ou dans le Nord, exposées à de grands froids ou des givres, il est souvent nécessaire d'installer un anémomètre chauffé mais cela implique un raccordement au réseau électrique.

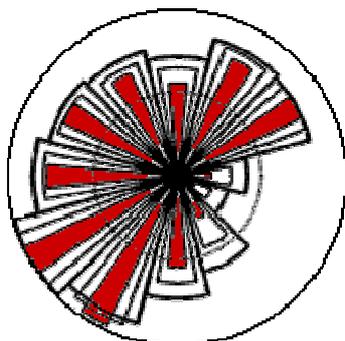
Vitesses de vent moyennées sur 10 minutes

En général, la vitesse du vent indiquée est la moyenne des vitesses enregistrées pendant un intervalle de 10 minutes. C'est donc en choisissant cet intervalle que vous



obtenez la plus grande compatibilité avec les logiciels vendus actuellement sur le marché. En principe, vous pouvez cependant aussi bien choisir d'autres intervalles de mesure. Comme nous allons voir plus loin, le choix d'intervalle n'est pas sans importance pour la vitesse du vent mesurée.

La rose des vents



© 1998 www.WINDPOWER.org

La rose des vents de Brest,

Comme nous l'avons vu au § sur les [ressources éoliennes](#), les vents les plus forts soufflent en général d'une direction particulière.

Afin de mieux se faire une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent, on peut construire une rose des vents à partir des observations météorologiques faites dans une région donnée.

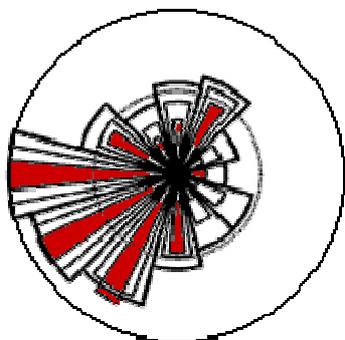
La rose des vents correspond à un compas. Comme vous voyez sur l'image, elle se compose de plusieurs sections, l'horizon ayant été divisé en douze secteurs de 30 degrés chacun. Cela correspond au standard appliqué par l'Atlas Eolien Européen, mais la rose des vents aurait tout aussi bien pu être construite avec huit ou seize secteurs.

Le rayon de chacun des douze secteurs coniques indique la fréquence relative de chaque direction du vent. La portion la plus petite dans chaque secteur montre la contribution au total de la vitesse moyenne de la direction du vent en question, tandis que la contribution totale de la moyenne du cube de la vitesse est donnée par la portion centrale marquée en rouge.

La capacité énergétique du vent variant avec le cube de la vitesse du vent, ce sont donc les sections marquées en rouge qui sont les plus intéressantes à étudier, lorsqu'on essaye de trouver un site propice à l'installation d'une éolienne.

Dans ce cas, nous voyons que la direction dominante du vent est sud-ouest, ce qui correspond tout à fait à la théorie avancée à la page sur les [vents globaux](#).

La rose des vents nous indique les vitesses relatives du vent soufflant dans des directions différentes. Chacun des trois types de données (fréquence, vitesse moyenne du vent, moyenne du cube) a été multiplié un certain nombre de fois de sorte que le rayon de la section la plus importante des douze correspond à celui du cercle concentrique le plus grand.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Les roses des vents ne sont pas toutes pareilles

Elles diffèrent d'une région à une autre. Elles constituent en fait une sorte d'empreinte climatologique.

Prenons par exemple cette rose des vents de Caen, ville située à seulement 150 km au nord de Brest. Bien que la direction préférentielle du vent soit la même, c.-à-d. sud-ouest, la rose révèle que pratiquement toute l'énergie éolienne provient de l'ouest et sud-ouest. Ici, nous constatons donc que, contrairement à ce qui est le cas à Brest, on peut se permettre de ne pratiquement pas tenir compte des autres directions du vent.

Cependant, les roses des vents pour deux régions avoisinantes sont souvent très similaires. Pour cette raison, ce sera souvent suffisamment sûr de déterminer les directions du vent en interpolant les roses établies pour les villes voisines ; c.-à-d. en prenant la moyenne des résultats enregistrés. Cependant, de telles estimations s'avéreront souvent insuffisantes s'il s'agit de terrains complexes (régions montagneuses et côtières, entre autres).

Mais n'oubliez pas que, dans tous les cas, la rose des vents indique la distribution relative des directions du vent - et non pas la vitesse réelle du vent. Afin de mesurer celle-ci il faut se servir d'un anémomètre.

Comment utiliser la rose des vents

La rose des vents joue un rôle très important dans la localisation de sites appropriés à l'installation d'éoliennes. Si une grande partie de l'énergie contenue dans le vent provient d'une direction particulière, il faut chercher à avoir aussi peu d'[obstacles](#) et un terrain aussi peu perturbé que possible dans cette direction.

Dans les deux exemples de Brest et de Caen, la direction principale du vent est le sud-ouest. Comme le vent ne souffle pratiquement jamais de l'est ou du sud-est, on n'a pas ici besoin de prendre en considération les obstacles situés dans ces deux directions.

Notez cependant que les régimes de vent ainsi que la capacité énergétique tendent à varier d'une année à une autre (en général d'environ 10 % au maximum) - par conséquent, pour obtenir un résultat crédible, il vaut mieux baser ses calculs sur des observations faites sur plusieurs années. Lorsqu'il s'agit de la construction de grandes centrales éoliennes, on se limite cependant souvent à réaliser des mesures spécifiques pendant un an, les corrigeant ensuite en les comparant aux mesures faites sur plusieurs années par les stations météorologiques de la région en question. Ce procédé permet de faire des estimations très précises de la distribution des vents et de leurs vitesses moyennes sur un site donné.

Comme les roses des vents figurant sur cette page proviennent de l'Atlas Eolien Européen, nous sommes plutôt confiants sur le fait qu'elles donnent une impression juste. L'Atlas Eolien Européen décrit la climatologie de chacune des stations météorologiques européennes tout en nous prévenant contre l'existence éventuelle de particularités climatologiques locales. A la page traitant du choix des sites, nous reviendrons aux [pièges](#) auxquels il faut faire attention lorsqu'on se sert de données météorologiques.

Rugosité et cisaillement du vent

A des altitudes élevées, à environ un km au-dessus du sol, l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. Par contre, dans les couches d'air plus basses, la friction contre la surface du terrain influe beaucoup sur la vitesse du vent. Dans l'industrie éolienne, on distingue entre la rugosité du terrain et l'influence exercée par les [obstacles](#) avoisinants et les contours du paysage (on parle aussi de l'orographie d'un paysage). L'importance de l'orographie sera étudiée plus loin, dans les paragraphes portant sur les effets accélérateurs : l'[effet de tunnel](#) et l'[effet de colline](#).

La rugosité

En règle générale, une rugosité forte freine considérablement la vitesse du vent.

Ainsi, les forêts et les grandes villes freinent évidemment beaucoup le vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'influe que peu sur la vitesse du vent. La surface de la mer a une rugosité encore plus faible que les pistes d'atterrissage ce qui fait qu'elle influe encore moins sur l'écoulement de l'air, alors que l'herbe longue, les buissons et les arbrisseaux freinent considérablement le vent.

Classes et longueurs de rugosité



Les moutons sont les meilleurs amis des éoliennes. Sur cette photo, vous voyez un paysage à Akaroa Spit en Nouvelle-Zélande où les moutons assurent que la rugosité du terrain reste faible.

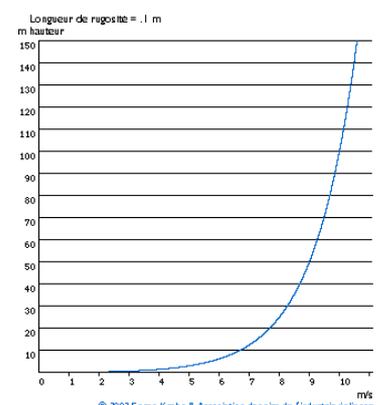
Dans l'industrie éolienne, on se réfère en général à deux notions lorsqu'on évalue le potentiel éolien d'un endroit donné : la classe de rugosité et la longueur de rugosité. Ainsi, les paysages à rugosité forte - avec beaucoup d'arbres ou d'immeubles - sont rattachés à la

classe de rugosité 3 ou 4 tandis que la surface de la mer est classée 0. Les pistes d'atterrissage en béton appartiennent à la classe de rugosité 0,5. Il en est de même du paysage que vous voyez à gauche, où l'herbe a été broutée par les moutons.

Dans le [manuel de référence](#), vous trouverez les définitions précises de classe et longueur de rugosité. Le terme longueur de rugosité désigne la hauteur au-dessus du sol à laquelle la vitesse moyenne du vent en théorie serait égale à zéro.

Le cisaillement du vent

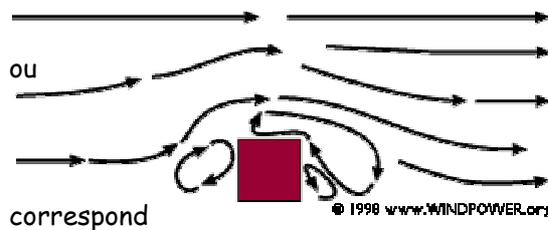
Nous avons fait le graphe ci-contre en utilisant notre [programme de calcul de la vitesse du vent](#). Il montre les variations de la vitesse du



vent dans un paysage appartenant à la classe de rugosité 2 (terre agricole cultivée, avec de rares maisons et clôtures, distantes les unes des autres de quelque 500 m), si nous supposons que la vitesse du vent est égale à 10 m/s à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol.

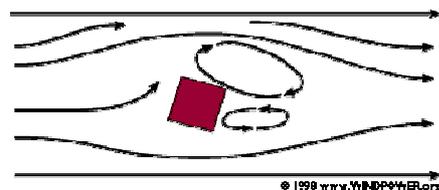
On parle normalement du cisaillement du vent pour désigner la variation de la vitesse du vent en fonction de la distance à la surface de la terre. Le cisaillement du vent est également pris en considération lors de la construction d'une éolienne. S'il est question d'une éolienne dont la hauteur de moyeu est de 40 m et le diamètre de rotor est de 40 m, la vitesse du vent sera égale à 9,7 m/s au point le plus haut de la surface balayée par le rotor, contre 7,7 m/s au point le plus bas. Cela signifie que les forces travaillant sur les pales sont bien plus fortes lorsque celles-ci se trouvent dans leur position la plus haute que lorsqu'elles se trouvent dans leur position la plus basse.

Les obstacles au vent



Les obstacles au vent, tels que les immeubles, les arbres, les rochers, peuvent freiner considérablement la vitesse du vent, tout en provoquant souvent de la [turbulence](#). Le dessin montre l'écoulement typique d'un flux d'air autour d'un obstacle. L'étendue de la zone turbulente correspond à environ trois fois la hauteur de l'obstacle, la turbulence étant plus forte derrière l'obstacle que devant celui-ci.

Par conséquent, il faut de préférence chercher à éviter la présence d'obstacles près d'une éolienne, particulièrement dans la direction des vents dominants, c.-à-d. devant l'éolienne.



Ici, l'écoulement de l'air autour d'un obstacle (une construction) est observé d'en haut.

Effet d'abri derrière l'obstacle (Effet d'obstacle)
Les obstacles freinent le vent en aval de l'obstacle. De combien le vent sera freiné par l'obstacle ? Cela dépend de la porosité de celui-ci, c.-à-d. de son ouverture (la porosité est définie comme la surface ouverte divisée par la surface totale de l'objet exposé au vent).

Un bâtiment est massif, sa porosité étant nulle, tandis qu'un arbre en hiver (sans feuilles) laisse passer plus que la moitié du vent. L'été, le feuillage des arbres peut être très dense, ce qui fait normalement baisser leur porosité à moins d'un tiers.

L'effet d'abri créé par un obstacle donné est fonction de sa hauteur et de sa longueur. Il va de soi que l'effet d'abri est surtout important tout près de l'obstacle et du sol.

Lorsque les constructeurs d'éoliennes font des estimations de la production d'énergie d'une éolienne, ils prennent normalement en considération tous les obstacles se trouvant dans la direction des vents dominants, à moins de 1 km de l'éolienne en question.

Effets accélérateurs : L'effet de tunnel

En utilisant une pompe de bicyclette ordinaire, vous verrez que la vitesse de l'air sortant de la valve est bien plus élevée que la vitesse du mouvement du piston. Ce phénomène est évidemment dû au fait que la valve est beaucoup plus étroite que le cylindre de la pompe. C'est l'effet de tunnel

Entre les grands bâtiments ou dans un col étroit, le même effet peut être observé.

Le vent se trouve comprimé sur le côté exposé au vent du bâtiment ou de la montagne, ce qui fait accélérer considérablement sa vitesse entre les obstacles.



Cela implique que, bien que la vitesse normale dans un terrain dégagé soit de, disons, 6 mètres par seconde, elle atteindra facilement 9 mètres par seconde dans un couloir naturel.

L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc une façon intelligente d'obtenir une vitesse de vent supérieure à celle de la zone ambiante.

Cependant, afin d'obtenir un effet de tunnel utilisable, le tunnel doit être enclavé de pentes douces. Si les collines entourant le tunnel sont très rugueuses et accidentées, il peut y avoir beaucoup de

turbulence dans le vent, ce qui fait que le vent change de vitesse et de direction sans cesse et très rapidement.

Trop de turbulence risque non seulement d'annuler complètement l'avantage obtenu par une vitesse de vent accélérée, mais aussi d'augmenter l'usure sur l'éolienne.

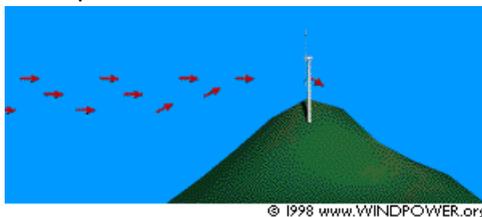
Effets accélérateurs : L'effet de colline

Juste avant d'arriver au sommet d'une montagne, le vent est accéléré et comprimé, et lorsqu'il arrive à l'autre côté, il devient lent et faible, comme les eaux qui coulent dans l'océan à travers un canal étroit.



En général, on cherche à installer les éoliennes sur une colline ou une chaîne de hauteurs qui sont plus élevées que le paysage environnant. Surtout, il faut de préférence avoir une vue aussi dégagée que possible dans la direction des vents dominants.

Si l'on rencontre souvent des vitesses de vent accélérées sur les collines, c'est à cause de la différence de pression existant à l'avant et à l'arrière de celles-ci. Ainsi, le vent se trouve comprimé par la colline à la face exposée au vent, pour s'étendre ensuite, une fois passé le sommet, vers la zone de basse pression du côté sous le vent de la colline.



Comme vous voyez sur l'image, le vent commence à dévier bien avant qu'il n'arrive à la colline. Ce phénomène est dû à l'étendue assez considérable de la zone de haute pression se trouvant à l'avant de la colline.

Notez également que le vent devient très turbulent en traversant le rotor de l'éolienne.

Tout comme c'était le cas pour l'effet de tunnel, une colline accidentée ou à pentes raides peut provoquer de fortes turbulences ce qui risque d'annuler l'avantage que l'on compte normalement gagner par une accélération de la vitesse.

Choix d'un site éolien



La ressource éolienne

Normalement, le seul fait d'observer la nature constitue une aide excellente lors de l'identification d'un bon site éolien.

Ainsi, comme vous pouvez le voir sur l'image à gauche, les arbres et les buissons peuvent servir d'un bon indicateur de la direction des vents dominants dans la zone en question.

De même, l'apparence d'un littoral accidenté peut indiquer que des siècles d'érosion ont travaillé dans une direction particulière.

Des données météorologiques, reproduites de préférence en forme d'une rose des vents sur 30 ans, seront probablement le meilleur guide, mais ces données ne sont que très rarement collectées sur le site exact en question, et de plus, comme nous l'expliquerons un peu plus loin, on doit pour plusieurs raisons toujours se servir de données météorologiques avec beaucoup de prudence.

S'il y a déjà des éoliennes à proximité, leur production d'électricité constitue un indicateur excellent de la ressource éolienne locale. Dans des pays comme le Danemark et l'Allemagne où l'on trouve

souvent des éoliennes dispersées un peu partout dans le pays, les constructeurs sont le plus souvent en mesure de fournir des résultats de production à base de calculs éoliens réalisés sur le site en question.

En recherche d'une vue dégagée

Comme vous venez de l'apprendre en lisant les pages précédentes, il faut de préférence avoir une vue aussi dégagée que possible dans la direction des vents dominants. De même, il faut qu'il y ait aussi peu d'obstacles et une [rugosité](#) aussi faible que possible dans cette direction. Si, de plus, vous réussissez à trouver une colline à pentes douces, il est même possible d'obtenir un [effet accélérateur](#).

Raccordement au réseau

Les grandes éoliennes doivent évidemment être raccordées au réseau électrique.

Lorsqu'il s'agit de projets éoliens de moindre envergure, il est donc primordial que l'éolienne soit installée relativement près d'une ligne électrique de 10 à 30 kilovolt (kV) afin d'éviter que les coûts de pose de nouveaux câbles ne soient exorbitants. (Évidemment, la question de savoir qui va payer pour l'extension des lignes électriques n'est pas sans importance dans ce contexte.)

Les générateurs des grandes éoliennes modernes produisent normalement de l'électricité à 690 V. Un transformateur situé soit à côté de l'éolienne, soit à l'intérieur de sa tour, convertit l'électricité en haute tension.

Renforcement du réseau électrique

Le réseau électrique près de l'éolienne installée doit être mis en état de recevoir l'électricité qu'elle produit. Si beaucoup d'éoliennes ont déjà été raccordées au réseau, il est possible qu'il faille le renforcer en posant un plus grand câble qui sera éventuellement raccordé plus près d'une station de transformation à haute tension. Pour de plus amples informations sur ce sujet, lisez notre section sur le [réseau électrique](#).

Infrastructure

Lors de l'élaboration d'un projet éolien, il faut toujours tenir compte des coûts liés à l'établissement des fondations des éoliennes et à la construction d'un chemin permettant aux camions lourds de gagner le site.

Risques liés à l'usage de données météorologiques

Les météorologues recueillent déjà des données météorologiques pour leurs prévisions du temps et pour l'aviation - et très souvent, ces données sont également utilisées pour évaluer les conditions éoliennes générales dans une région déterminée.

Cependant, des mesures précises de la vitesse du vent - et donc de l'énergie éolienne - sont bien plus importantes pour la réalisation d'un projet éolien que c'est le cas lorsqu'il s'agit de faire des prévisions du temps.

Ainsi, la vitesse du vent se trouve très influencée par la rugosité de la zone environnante, par les obstacles avoisinants (arbres, phares, bâtiments,...) et par les contours du terrain local.

A moins que vous ne fassiez des calculs qui compensent les conditions locales prévalant à l'endroit où les mesures météorologiques ont été réalisées, il est très difficile de faire des estimations de la ressource éolienne sur un site donné, même lorsque celui-ci est situé à proximité de la station météo. Dans la plupart des cas, on risque de sous-estimer le potentiel éolien si l'on se sert de données météorologiques sans les ajuster pour le site en question.

Aux pages suivantes, nous allons voir comment les professionnels calculent la vitesse du vent.

La ressource éolienne offshore

Eolienne offshore de 500 kW installée à Tunø Knob, Danemark.

Conditions éoliennes en mer

Les surfaces de la mer et des lacs sont évidemment très lisses ce qui fait que leur [rugosité](#) est très faible à des vitesses de vent constantes. A des vitesses de vent accélérées, une partie de l'énergie contenue dans le vent va à la production de vagues, ce qui augmente la rugosité. Une fois les vagues formées, la rugosité décroît de nouveau. Il est donc question d'une surface de rugosité



variable (le même phénomène se voit dans les zones couvertes d'une couche de neige plus ou moins épaisse).

Cependant, en règle générale, la rugosité d'une surface d'eau est très faible, de même que les obstacles au vent ne sont que très peu nombreux en mer.

En réalisant les calculs du potentiel éolien offshore, il faut toujours tenir compte des îles, phares, etc., de la même façon que l'on doit considérer les obstacles se trouvant dans la direction des vents dominants ou les changements de rugosité du terrain lorsqu'il s'agit d'évaluer un site éolien terrestre.

Un cisaillement bas permet de réduire la hauteur du moyeu

La rugosité de la mer étant très faible, le cisaillement du vent est lui aussi très bas, ce qui signifie que l'on n'obtiendra pas, comme c'est le cas sur la terre ferme, une augmentation significative de la vitesse du vent en accroissant la hauteur du moyeu. Par conséquent, en mer, il peut s'avérer plus économique d'utiliser des tours d'une hauteur moins élevée que sur terre, correspondant à environ 0,75 fois le diamètre du rotor suivant les conditions éoliennes sur le site en question (normalement, la hauteur des tours installées sur la terre ferme correspond à 1 diamètre de rotor au minimum).

Moindre intensité de la turbulence = prolongation de la durée de vie de l'éolienne

En général, le vent est moins turbulent sur mer que sur terre. La durée de vie espérée des éoliennes installées en mer est donc supérieure à celle des éoliennes terrestres.

La faible turbulence est avant tout due au fait que les variations de température entre les différentes altitudes de l'atmosphère sont moins importantes au-dessus de la mer qu'au-dessus de la terre. Les rayons du soleil pénètrent la mer de plusieurs mètres, alors que sur la terre ferme, le rayonnement solaire ne réussit qu'à chauffer la couche supérieure du sol qui devient donc beaucoup plus chaude. Par conséquent, les écarts de température entre la surface et l'air sont moins importants au-dessus de la mer qu'au-dessus de la terre. Et c'est la raison pour laquelle la turbulence y est bien plus faible.

L'effet d'abri en mer

Actuellement, le Laboratoire national de Risoe est en train de développer une version offshore de son programme WAsP employé jusqu'ici pour la modélisation du vent sur la terre ferme.

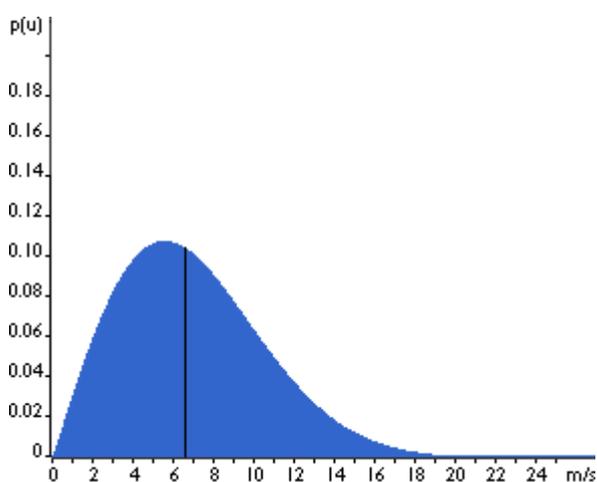
Les différents résultats de production enregistrés au premier parc éolien offshore situé à Vindeby (Danemark) ainsi qu'à celui de Tunoe Knob (Danemark également) construit quelques années plus tard, ont conduit à de nouvelles investigations depuis 1996 par l'emplacement d'anémomètres sur plusieurs sites en mer au large du littoral danois.

Les premiers résultats indiquent que l'effet d'abri de la terre ferme est plus important, même à des distances de 20 km, qu'on ne l'avait cru au départ. Cependant, il s'est également révélé que les ressources éoliennes offshore sont de quelque 5 à 10 % supérieures aux premières estimations.

Description de la variation du vent : La distribution de Weibull

Modèle général des variations de la vitesse du vent

Il est très important pour l'industrie éolienne d'être en mesure de décrire les variations de la vitesse du vent. Les fabricants utilisent ces informations pour optimiser la conception des éoliennes dans le but de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. Les investisseurs, eux, ont besoin de ces



informations afin de pouvoir estimer le revenu lié à la production d'électricité.

Si vous mesurez la vitesse du vent durant une année, vous remarquerez que, dans la plupart des régions du monde, les vents extrêmes sont très rares alors que des vents frais ou modérés sont assez fréquents.

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-dessus. Sur le site en question, la vitesse moyenne du vent est de 7 m/s, et la forme de la courbe est déterminée par ce qu'on appelle un paramètre de forme égal à 2.

Description statistique des vitesses du vent

Ceux qui sont déjà habitués à travailler avec des statistiques se rendront tout de suite compte que ce que le graphe ci-dessus représente est une distribution de probabilité (distribution fréquentielle). La probabilité que le vent souffle à une vitesse quelconque (zéro inclus) étant obligatoirement égale à 100 %, la zone au-dessous de la courbe sera toujours égale à exactement 1.

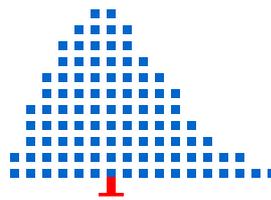
La moitié de la zone bleue se trouve à gauche de la ligne verticale noire située à 6,6 m/s. On dit alors que 6,6 m/s est la médiane de la distribution. Cela signifie que le vent souffle à moins de 6,6 m/s la moitié du temps, et à plus de 6,6 m/s pendant l'autre.

Vous vous demandez peut-être pourquoi nous avons alors fixé la vitesse moyenne à 7 m/s. Voici l'explication : la vitesse moyenne est en fait la moyenne des vitesses de vent enregistrées sur le site en question.

Comme vous pouvez le voir sur le graphe, la distribution des vitesses du vent est oblique, donc asymétrique. Parfois il y aura des vents très forts, mais ce ne sera que très rarement. En revanche, les vitesses de vent de 5,5 m/s sont les plus fréquentes. On dit alors que 5,5 mètres par seconde est la valeur modale de la distribution. Si nous multiplions chaque petit intervalle de vitesse par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse de vent particulière, et que nous totalisons ensuite tous les résultats, nous obtiendrons la vitesse moyenne du vent.

La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, le paysage et sa surface. La distribution de Weibull tend donc à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne.

Dans le cas où le paramètre de forme est égal à exactement 2, comme c'est le cas pour le graphe ci-dessus, on parle d'une distribution de Rayleigh. Les fabricants fournissent souvent les calculs de performance en utilisant la distribution de Rayleigh.



Équilibrage de la distribution de Weibull

Une autre façon de connaître la vitesse moyenne du vent est d'équilibrer la pile de cubes bleus vers la droite de façon à montrer exactement la même image que le graphe ci-dessus. Chaque cube représente la probabilité que le vent souffle à une vitesse donnée pendant 1 % des heures d'une année. Les vitesses de vent de 1 m/s ont été rangées dans la colonne la plus à gauche alors que ceux de 17 m/s correspondent à la colonne la plus à droite.

Dans notre cas, c'est dans la septième colonne que la pile se trouve complètement en équilibre, ce qui nous signale que la vitesse moyenne du vent est égale à 7 m/s.

Essayez-le !

Si vous disposez d'un navigateur [Netscape 3 ou 4](#) ou [Internet Explorer 4](#), la page suivante vous donnera la possibilité d'expérimenter avec différentes valeurs des paramètres de Weibull. Cela vous permettra de vous faire une idée des formes que peut prendre la distribution fréquentielle des différentes vitesses du vent.

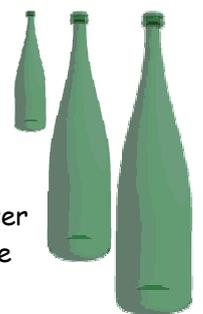


Le problème de la bouteille moyenne

Quel est le contenu énergétique moyen du vent sur le site où est située votre éolienne ?

La plupart des gens qui découvrent l'énergie éolienne ont au début la conviction qu'ils vivront très bien sans connaître la [distribution de Weibull](#). Après tout, n'est-ce pas exact que si nous connaissons la vitesse moyenne du vent, nous connaissons également sa puissance moyenne ? Ne pourrions-nous donc pas utiliser la puissance (ou l'énergie) à la vitesse moyenne du vent pour calculer la puissance (ou l'énergie) qui arrivera à la surface balayée par le rotor ?

En d'autres mots, ne pourrions-nous pas simplement dire qu'avec une vitesse de vent égale à 7 m/s, nous obtiendrons une puissance d'entrée de 210 W par mètre carré de surface balayée par le rotor ? (Ce chiffre figure dans le tableau sur la puissance du vent que vous trouverez dans le [manuel de référence](#).)



Eh bien, la réponse est non ! Le cas échéant, nous ferions une sous-estimation de presque 100 % des ressources éoliennes. Si nous calculions ainsi, nous serions alors victimes de ce que nous pouvons appeler l'illusion de la bouteille moyenne. Si vous observez la plus grande et la plus petite des bouteilles de l'image, vous remarquerez que les deux ont exactement la même forme. L'une mesure 0,24 m de haut, l'autre 0,76 m. Quelle est alors la hauteur de la bouteille moyenne ?

Si votre réponse est 0,5 m, vous êtes dupe de l'illusion de la bouteille moyenne. Ce qui nous intéresse ici est évidemment le volume des bouteilles. Celui-ci varie avec le cube (puissance 3) de la taille de la bouteille. Il s'en suit que bien que la plus grande bouteille ne soit que 3,17 fois plus grande que la plus petite, le volume de celle-là est en fait $3,17^3 = 32$ fois plus grand que celui de la plus petite.

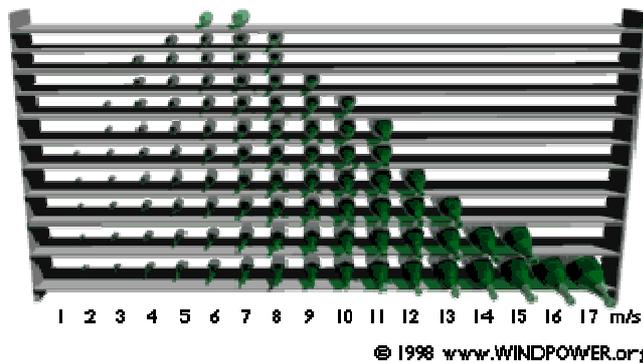
Par conséquent, le volume moyen est 16,5 fois celui de la petite bouteille. Cela signifie qu'une bouteille d'un volume moyen doit avoir une hauteur 2,55 fois plus grande que celle de la petite bouteille, donc de 0,61 m (étant donné que $2,55^3 = 16,5$).

Ce que nous cherchons à démontrer par cet exemple est qu'il n'est pas souhaitable de se limiter à calculer la puissance du vent à partir de la vitesse moyenne du vent sur le site en question. Vous devez en fait peser la probabilité de l'occurrence de chaque vitesse de vent et la puissance correspondante. Aux pages suivantes, nous calculerons l'énergie du vent. D'abord nous utilisons l'exemple de la bouteille pour bien comprendre l'idée, ensuite nous nous servons des mathématiques.

La puissance moyenne du vent

Équilibrage de la distribution de la puissance

C'est à cause de leur contenu énergétique que les vitesses du vent nous intéressent, tout comme c'était le volume des bouteilles - et non leur hauteur - qui nous intéressait à la [page précédente](#). Comme nous venons de le voir, le volume d'une bouteille varie avec le cube de sa taille, de la même façon que la puissance du vent varie avec le cube de la vitesse du vent. Prenons la distribution de Weibull des vitesses du vent, et plaçons pour chaque vitesse une bouteille à l'étagère chaque fois que la probabilité de l'occurrence de cette vitesse particulière est égale à 1 %. La taille de chaque bouteille correspond à la vitesse du vent, et le poids des bouteilles à la quantité d'énergie contenue dans le vent.



A droite, à 17 m/s, nous avons posé les bouteilles très lourdes d'un poids supérieur de presque 5.000 fois à celui des bouteilles rangées à 1 m/s. (A 1 m/s, la puissance du vent est égale à $0,61 \text{ W/m}^2$, à 17 m/s elle est de 3.009 W/m^2 .)

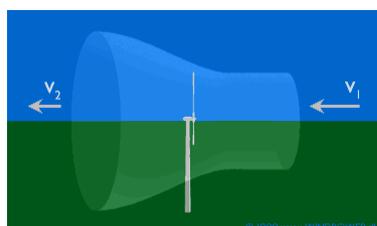
Calculer la vitesse du vent à laquelle nous obtiendrons la moyenne de la distribution de

puissance correspond à équilibrer les étagères. (Rappelez-vous comment nous avons fait l'équilibrage à la page sur la [distribution de Weibull](#)). Dans ce cas, bien qu'ils ne soient que peu fréquents, les vents forts pèsent lourd à cause de leur contenu énergétique important.

A une vitesse moyenne du vent de 7 m/s, la moyenne de la puissance pondérée des vitesses de vent correspond à 8,7 m/s. A cette vitesse, la puissance du vent est égale à 402 W/m^2 ce qui est presque le double du résultat auquel nous sommes arrivés en faisant le calcul plutôt naïf en haut de la page précédente.

Aux pages suivantes, nous allons utiliser une méthode plus convenable que le déplacement de bouteilles pour calculer la puissance du vent...

La loi de Betz



Le freinage idéal du vent

Plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus remarquable sera le ralentissement du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne sur l'image. (Si vous ne comprenez pas pourquoi nous avons mis un tube de courant autour de l'éolienne, vous devez lire la page sur la [déviation du vent provoquée par une éolienne.](#)) Si nous tentions 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 que nous aurions cherché à obtenir : aucune énergie ne serait extraite du vent, l'entrée de l'air dans le rotor étant évidemment également empêchée.

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

Nous pouvons 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. 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. Afin de bien comprendre pourquoi, nous devons utiliser la loi physique fondamentale de l'aérodynamique des éoliennes :



La limite de Betz

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. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1919, formula la loi de Betz pour la première fois. Son livre "Wind-Energie" (Energie éolienne) publié en 1926 donne une bonne idée de l'état des connaissances en énergie éolienne et des aérogénérateurs de l'époque.

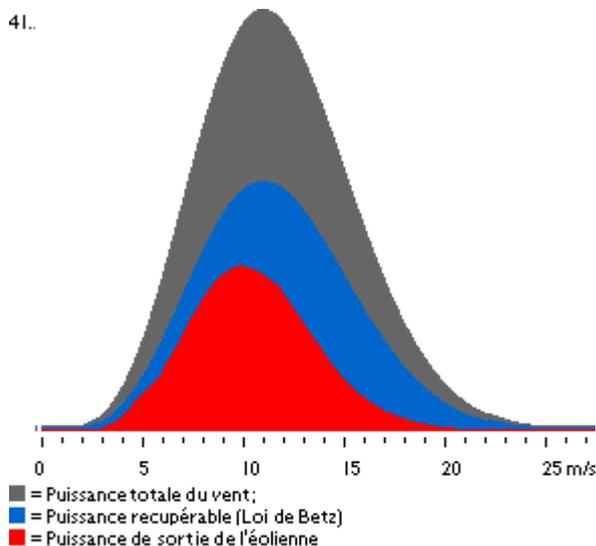
Il est en fait très surprenant qu'il soit possible de formuler une telle théorie générale qui s'applique à toute éolienne ayant un rotor en forme de disque. Pour prouver le théorème, il faut avoir une certaine connaissance des mathématiques et de la physique, mais, comme Betz l'a écrit dans son livre, vous ne devez pas vous laisser décourager par ce fait. Nous avons inclus dans notre manuel de référence [la preuve qu'a faite Betz lui-même du théorème.](#)

a densité de puissance

La puissance du vent

Comme expliqué à la page sur [l'énergie du vent](#), le potentiel d'énergie par seconde varie proportionnellement avec cube de la vitesse du vent (puissance 3) et la densité de l'air (son poids par unité de volume).

41..



Nous pouvons maintenant combiner tout ce que nous avons appris jusqu'ici en multipliant la [puissance](#) de chaque vitesse de vent par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse selon le graphe de [Weibull](#), ce qui nous permet de calculer la distribution de l'énergie éolienne à des vitesses de vent différentes, distribution appelée aussi la densité de puissance.

Notez que la distribution de Weibull change de forme par rapport à celle de la page précédente du fait que ce sont les vents forts qui contiennent le plus d'énergie.

De la densité de puissance à la puissance de sortie
Ce graphe a été tracé en utilisant le [programme de calcul de la puissance produite par une éolienne](#) que

vous trouverez également sur ce site web. La zone au-dessous de la courbe grise (jusqu'à l'axe horizontal en bas) nous indique la quantité de puissance éolienne par mètre carré de flux d'air que nous pouvons espérer obtenir sur le site en question. Dans ce cas, nous avons une vitesse moyenne de vent de 7 m/s et un paramètre de forme $k=2$ ce qui correspond à une puissance éolienne de 402 W/m^2 . Vous devez remarquer que cette puissance est presque le double de celle obtenue lorsque le vent souffle constamment à sa vitesse moyenne.

Le graphe consiste en un certain nombre de colonnes verticales, une pour chaque intervalle de 0,1 m/s de vitesse de vent. La hauteur de chaque colonne correspond à la puissance (watts par mètre carré) avec laquelle cette vitesse de vent particulière contribue à la puissance totale de sortie par mètre

carré. La zone au-dessous de la courbe bleue indique la puissance théoriquement convertible en puissance mécanique (c.-à-d. $16/27$ de la puissance totale du vent, selon la [loi de Betz](#)). L'entière zone au-dessus de la courbe rouge, nous indique la puissance que produira une éolienne sur le site en question. Nous apprendrons comment faire ce calcul lorsque nous arriverons à la page sur les [courbes de puissance](#).

Lire le message du graphe

Le point le plus important à noter est que c'est à des vitesses de vent supérieures à la vitesse moyenne sur le site en question que l'on trouve la plus grande partie de l'énergie éolienne récupérable.

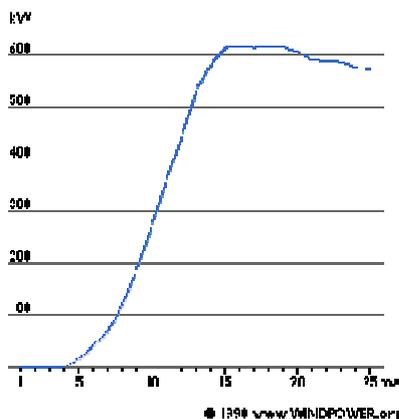
Ce fait n'est pas aussi surprenant qu'il ne paraît étant donné que nous savons déjà que le vent a un [contenu énergétique](#) beaucoup plus élevé à des vitesses de vent fortes qu'à des vitesses faibles.

Vitesse de démarrage

Normalement, les éoliennes sont conçues pour démarrer à des vitesses de vent de 3 à 5 m/s. On appelle cette vitesse la vitesse de démarrage. Sur le graphe, la zone bleue à gauche montre la petite quantité de puissance perdue à cause du fait que l'éolienne ne démarre qu'à une vitesse de, disons, 5 m/s.

Vitesse de coupure

L'éolienne est normalement programmée pour s'arrêter automatiquement lorsque le vent souffle à plus de 25 m/s afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne ou de son entourage. La vitesse à laquelle l'éolienne s'arrête est appelée la vitesse de coupure. La petite zone bleue du graphe représente la puissance qui est perdue à cause de vitesses de vent trop fortes.



La courbe de puissance d'une éolienne

La courbe de puissance est un graphe représentant la puissance de sortie d'une éolienne à des vitesses de vent différentes.

Le graphe montre une courbe de puissance d'une éolienne danoise typique de 600 kW.

On élabore les courbes de puissance à partir de mesures réalisées sur site en fixant un [anémomètre](#) sur un mât situé à proximité de l'éolienne (pas sur l'éolienne même ou trop près d'elle vu qu'elle risquera alors de provoquer des turbulences qui nuiront à la fiabilité des mesures).

Dans le cas où les fluctuations de la vitesse de vent ne sont pas trop rapides, il est possible d'utiliser directement les mesures de la vitesse du vent obtenues par l'anémomètre et de lire la puissance de sortie. Si, ensuite, on trace les deux valeurs conjointement, on obtiendra un graphe similaire à celui que vous voyez ci-dessus.

Incertitudes liées à l'élaboration de courbes de puissance

Ce que l'on verra en faisant une courbe de puissance est en réalité une multitude de points espacés autour de la ligne bleue, plutôt qu'une courbe bien définie comme celle du graphe ci-dessus.

La raison en est qu'il y aura toujours des fluctuations de la vitesse du vent ce qui rend impossible de mesurer de façon précise le flux d'air passant à travers le rotor de l'éolienne. (Placer un anémomètre devant l'éolienne ne résoudra pas ce problème, l'éolienne projetant également une "ombre" en amont qui freine, elle aussi, le vent.)

Dans la pratique, on doit donc prendre la moyenne des différentes mesures pour chaque vitesse de vent et les utiliser pour tracer le graphe.

De plus, il est difficile d'obtenir des mesures précises de la vitesse du vent. S'il y a une erreur de seulement 3 % dans la mesure de la vitesse du vent, le [contenu énergétique](#) réel du vent pourra être 9 % supérieur ou inférieur au résultat obtenu (rappelez-vous que le contenu énergétique varie avec le cube de la vitesse du vent).

Par conséquent, il faut prévoir un risque d'erreur de +/- 10 %, même dans les courbes de puissance certifiées.

Vérification des courbes de puissance

Les courbes de puissance sont basées sur des mesures faites dans des terrains où la [turbulence](#) est faible et où le vent souffle directement vers la face de l'éolienne. Des turbulences locales et un terrain complexe (p.ex. une pente rugueuse) peuvent impliquer que des rafales de vent frappent le

rotor depuis des directions diverses. Dans ce cas-là, il peut s'avérer difficile de reproduire de façon exacte la courbe de puissance d'une éolienne installée sur un site donné.

Risques liés à l'utilisation d'une courbe de puissance

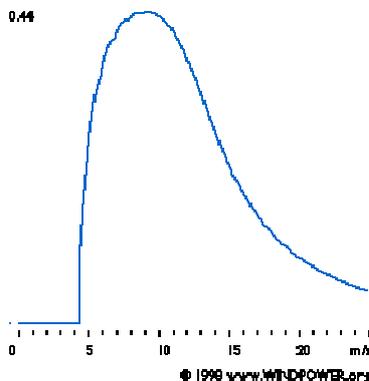
Une courbe de puissance n'indique pas la puissance que produira une éolienne à une certaine vitesse moyenne du vent. Si vous utilisiez cette méthode de calcul, vous seriez même très loin du résultat correct !

N'oubliez pas que le contenu énergétique du vent varie considérablement avec la vitesse du vent (voir la section sur [l'énergie du vent](#)). Par conséquent, il est très important de savoir comment cette moyenne a été calculée, c.-à-d. si le vent est très variable, ou s'il souffle à une vitesse relativement constante. De plus, comme expliqué dans la section sur la [densité de puissance](#), la plupart de l'énergie éolienne est captable à des vitesses de vent deux fois supérieures à la vitesse de vent la plus fréquente sur le site en question.

Finalement, vous devez également prendre en compte le fait que l'éolienne ne tournera peut-être pas sur le site en question à la pression d'air et la température standard. Dans ce cas, vous devez corriger la courbe pour les variations de la densité de l'air.

Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie du vent en électricité.



Nous prenons, en d'autres mots, la [courbe de puissance](#) et la divisons par la surface du rotor afin d'obtenir la puissance de sortie par mètre carré de la surface balayée par le rotor. Pour chaque vitesse de vent, nous divisons ensuite le résultat par la [puissance du vent](#) par mètre carré.

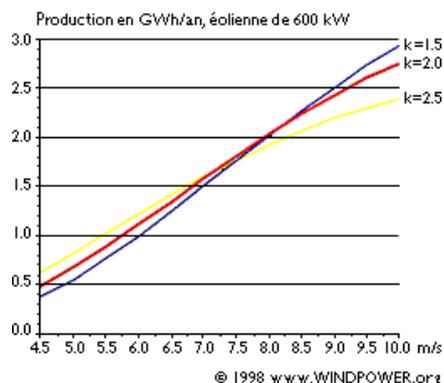
Le graphe montre la courbe du coefficient de puissance pour une éolienne typique. Bien que l'efficacité moyenne d'une telle éolienne soit normalement supérieure à 20 %, elle varie considérablement avec la vitesse de vent (de petites oscillations dans la courbe sont généralement dues à des erreurs de mesure).

Comme vous pouvez le voir, l'efficacité mécanique de l'éolienne est la plus élevée (44 % dans ce cas) à une vitesse de vent d'environ 9 m/s. Cette valeur a été choisie délibérément par les ingénieurs qui ont conçu l'éolienne. A des vitesses de vent faibles, l'efficacité n'est pas un sujet très important étant donné qu'il n'y a pas beaucoup d'énergie à récupérer. A des vitesses de vent élevées, l'éolienne perd forcément toute énergie excédant la quantité pour laquelle l'éolienne a été conçue. La question d'efficacité trouve donc avant tout sa valeur à des vitesses de vent où l'on trouve la plus grande partie de l'énergie récupérable.

Une efficacité technique majeure n'est pas nécessairement le chemin à suivre

Aussi surprenant que cela puisse paraître, il n'est pas un but en soi d'obtenir une efficacité technique élevée. Ce qui importe réellement est le coût de la récupération des kWh du vent pendant les 20 ans de fonctionnement de l'éolienne. Comme le combustible est gratuit, il n'est pas nécessaire de le mettre en réserve. L'éolienne optimale n'est donc pas forcément celle qui produira la plus grande énergie de sortie annuelle.

De l'autre côté, comme chaque mètre carré de la surface du rotor coûte de l'argent, il est évidemment nécessaire de récupérer le plus d'énergie possible - à condition



que le coût par kWh reste limité. Nous élaborons ce sujet plus en profondeur à la page sur [l'optimisation des éoliennes](#).

Production annuelle d'énergie d'une éolienne

Nous sommes maintenant prêts à calculer la relation entre les vitesses moyennes du vent et la production annuelle de sortie d'une éolienne.

Pour tracer le graphe à droite, nous avons utilisé le [programme de calcul de la puissance produite par une éolienne](#) que vous trouverez à la page précédente, ainsi que la [courbe de puissance](#) d'une éolienne typique de 600 kW. Nous avons basé les calculs sur une densité de l'air standard égale à 1.225 kg/m³.

Pour chacun des paramètres de [Weibull](#) de 1,5-2,0-2,5, nous avons calculé la puissance de sortie annuelle à différentes vitesses de vent moyennes au moyeu de l'éolienne.

Comme vous voyez, à une vitesse moyenne faible de 4,5 m/s, la production d'énergie peut varier jusqu'à 50% suivant le [paramètre de forme](#), alors que, à une vitesse moyenne très élevée, la variation ne sera que de 30% environ.

La production d'énergie varie presque avec le cube de la vitesse du vent

Regardons maintenant la courbe rouge avec $k=2$, celle que les fabricants d'éoliennes montrent le plus souvent à leurs clients.

Avec une vitesse moyenne du vent de 4,5 m/s à la hauteur du moyeu, l'éolienne produira environ 0,5 GWh par an (=500.000 kWh). Avec une vitesse moyenne du vent de 9 m/s, elle produira 2,4 GWh (=2.400.000 kWh) par an. En doublant la vitesse moyenne du vent, la puissance de sortie sera donc 4,8 fois plus élevée (nous obtiendrons donc une augmentation de la production d'énergie de 4,8 fois.)

Si, à la place, nous avions comparé 5 et 10 m/s, nous aurions obtenu une puissance de sortie qui serait presque 4 fois plus grande.

La raison pour laquelle nous n'obtenons pas exactement les mêmes résultats dans les deux cas, est que le rendement de l'éolienne dépend de la vitesse du vent, ainsi qu'il ressort de la courbe de puissance.

Remarquez que l'incertitude liée à la courbe de puissance vaut également pour le graphe ci-dessus.

Vous pouvez affiner les calculs en prenant en compte d'autres facteurs susceptibles d'influer sur le résultat. Dans les climats tempérés, par exemple, le vent tend à être plus fort en hiver qu'en été, et plus fort pendant la journée que pendant la nuit.

Le facteur de capacité

Une autre façon de connaître la production annuelle d'énergie d'une éolienne est de considérer son facteur de capacité sur le site où elle est située. Le facteur de capacité est la puissance de sortie annuelle divisée par la production théorique maximale de l'éolienne si elle fonctionnait à sa puissance nominale (maximale) pendant l'ensemble des 8.766 heures de l'année.

Exemple : Si une éolienne de 600 kW produit 1,5 millions de kWh en un an, son facteur de capacité sera égal à 1.500.000 divisé par $(365,25 * 24 * 600) = 1.500.000 : 5.259.600 = 0,285 = 28,5\%$.

En théorie, les facteurs de capacité peuvent varier de 0 à 100%, mais en pratique ils se situent entre 20 à 70%, et le plus souvent entre 25 et 30%.

Le paradoxe du facteur de capacité

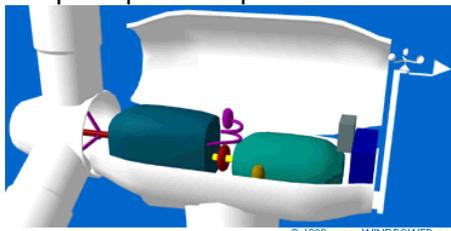
Bien qu'un facteur de capacité élevé soit en général à préférer, ce n'est pas obligatoirement un avantage d'un point de vue économique. Ce fait intrigue souvent les gens habitués à travailler avec les technologies conventionnelles ou nucléaire.

Ainsi, sur un site très venté, il peut s'avérer avantageux d'utiliser un générateur plus performant tout en gardant un rotor du même diamètre que normalement (ou bien combiner un générateur donné avec un plus petit rotor que d'habitude). Normalement, on diminuera ainsi le facteur de capacité (en utilisant une moindre partie de la capacité d'un générateur relativement plus performant), mais cela pourra également impliquer une production annuelle substantiellement majorée ainsi que vous pouvez le voir en utilisant notre [programme de calcul d'une éolienne](#).

S'il vaut la peine ou non d'opter pour un plus bas facteur de capacité avec un générateur relativement plus grand dépendra des conditions éoliennes - et du prix de vente des différents modèles d'éoliennes, bien évidemment.

D'une façon simplifiée, on peut également dire que vous devez choisir entre une puissance de sortie relativement stable (près de la limite de conception de l'éolienne) avec un facteur de capacité élevé, et une puissance de sortie élevée et fluctuante avec un facteur de capacité bas.

Les principaux composants d'une éolienne



Cliquez sur les différents composants de l'éolienne ouverte afin d'apprendre plus sur [la nacelle](#), [les pales du rotor](#), [le moyeu](#), [l'arbre lent](#), [le multiplicateur](#), [l'arbre rapide avec son frein mécanique](#), [la génératrice](#), [le dispositif d'orientation](#), [le système contrôle-commande](#), [système hydraulique](#), [l'unité de refroidissement](#), [la tour](#), [l'anémomètre et la girouette](#).

L'aérodynamique des éoliennes : la portance

Le rotor constitué par les pales et le moyeu est placé en amont de la tour et de la nacelle sur la plupart des éoliennes modernes, du fait que le flux d'air derrière la tour est très irrégulier et turbulent.

Que fait tourner le rotor ?



© 1998 www.WINDPOWER.org

La réponse semble bien simple : le vent, évidemment ! Cependant, la réalité est un peu plus compliquée que cela. Il ne s'agit pas simplement de molécules d'air frappant le bord d'attaque des pales et faisant tourner l'éolienne. L'industrie des éoliennes modernes emprunte en fait plusieurs technologies de l'industrie aéronautique, mais utilise également quelques principes propres à elle, étant donné que le changement fréquent de la vitesse et de la direction du vent dans la couche d'air où doivent opérer les

éoliennes, crée des conditions de fonctionnement qui sont assez différentes de celles des avions.

Portance



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Regardez la coupe

transversale de l'aile d'un avion sur l'image à gauche. La raison pour laquelle un avion peut voler est que l'écoulement de l'air autour du profil est plus rapide sur l'extrados (le dessus) que sur l'intrados (le dessous) de l'aile.

La dépression qui en résulte à l'extrados de l'aile, crée la portance, c.-à-d. la force qui soulève l'avion vers le haut, lui permettant de voler. La portance est perpendiculaire à la direction du vent. Les couvreurs de toits connaissent le phénomène de la portance depuis des siècles : instruits par expérience, ils savent que le matériel du toit du côté sous le vent (le côté qui n'est pas face au vent) s'arrache rapidement si le toit n'a pas été bien fixé à son substructure.

L'aérodynamique des éoliennes : décrochage et traînée

Décrochage aérodynamique



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Que se passe-t-il alors si un avion s'incline trop vers l'arrière dans une tentative de monter plus rapidement ? Certes, la portance de l'aile augmentera, mais, comme vous pouvez le voir sur l'image, l'écoulement de l'air au-dessus de l'aile arrête soudainement de suivre de façon régulière la surface de l'extrados. A la place, l'air commence à tourner dans un

tourbillon irrégulier (on parle également de turbulence). Du coup, la portance résultant de la dépression à l'extrados de l'aile disparaît. Ce phénomène est appelé décrochage aérodynamique.

L'aile d'un avion décrochera, si sa forme s'éloigne trop de la direction générale de l'écoulement de l'air. (En réalité, la forme de l'aile ne change évidemment pas; c'est en fait l'angle d'incidence - appelé aussi l'angle d'attaque - que nous avons augmenté sur le dessin ci-dessus. Notez que la turbulence est provoquée à l'extrados de l'aile par rapport à l'écoulement de l'air.

Le décrochage peut avoir lieu si la surface de l'aile d'un avion - ou de la pale d'une éolienne - n'est pas tout à fait uniforme et lisse. Une bosselure dans la surface de l'aile ou de la pale, ou bien une petite pièce de scotch, peuvent suffire pour provoquer de la turbulence à l'extrados, même lorsque l'angle d'attaque est assez petit. Les concepteurs d'avions cherchent évidemment à éviter le décrochage aérodynamique à tout prix, étant donné qu'un avion sans la portance de ses ailes tombera à terre comme une pierre.

A la page sur la contrôle de puissance, nous allons voir de plus près comment les ingénieurs de l'industrie éolienne utilisent délibérément le phénomène de décrochage aérodynamique lorsqu'ils conçoivent les pales du rotor.

Traînée

Ce n'est cependant pas uniquement de la portance et du décrochage que les concepteurs d'avions se préoccupent. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance d'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente.

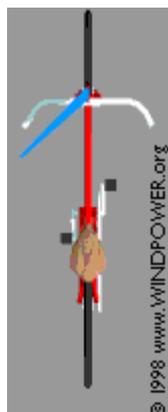
L'aérodynamique des éoliennes



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Somme vectorielle des différentes vitesses et directions du vent
Contrairement à ce que l'on pourrait croire, le vent frappant les pales du rotor ne viendra pas de la direction dans laquelle le vent souffle dans le paysage, c.-à-d. du côté en amont de l'éolienne. Cela est dû au fait que les pales du rotor se meuvent.

Pour bien comprendre pourquoi, regardez l'animation du vélo muni d'une banderole bleue (ou une girouette) indiquant la direction du vent. Si le temps est tout à fait calme et que le vélo avance à, disons, 7 m/s, le vélo traversera l'air à 7 m/s. Sur le vélo, on pourra mesurer une vitesse de vent par rapport au vélo de 7 m/s. La banderole sera orientée directement vers l'arrière, étant donné que le vent souffle directement du devant du vélo.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Regardons maintenant le vélo directement d'en haut, supposant, comme tout à l'heure, qu'il avance à une vitesse constante de 7 m/s. Si le vent souffle directement de droite, la banderole sera partiellement tournée vers la gauche, dans un angle de 45 degrés par rapport au vélo. Avec une vitesse du vent un peu plus faible, de p.ex. 5 m/s, la banderole déviara un peu moins vers la gauche, l'angle étant de quelque 35 degrés. Comme vous pouvez le voir sur l'image, la direction du vent, c.-à-d. le vent résultant, mesurée sur le vélo, change en fonction des changements de la vitesse du vent.

Et la vitesse du vent mesurée sur le vélo, que se passe-t-il pour elle alors ?

Le vent souffle, pour ainsi dire, à une vitesse de 7 m/s du devant du vélo, et à une vitesse de 5 à 7 m/s depuis la droite. Avec une certaine connaissance de la géométrie ou de la trigonométrie, il est possible de calculer que la vitesse moyenne du vent sur le vélo

doit être entre 8,6 et 9,9 m/s.

Assez maintenant sur les variations de la direction du vent. Voyons à la page suivante l'influence qu'elles exercent sur le rotor de l'éolienne

L'aérodynamique du rotor

Afin d'étudier l'écoulement de l'air autour des pales du rotor d'une éolienne, nous avons fixé des rubans rouges tout au bout des pales de l'éolienne sur l'animation, et des rubans jaunes à une distance d'environ 1/4 de la longueur de la pale, loin du moyeu.



Après, nous laissons les rubans flotter librement dans l'air (sur l'animation, nous n'avons pas tenu compte des filets d'air créés par les pales mêmes, ni de la force centrifuge).

Les deux animations de cette page vous montreront l'éolienne vue du côté et d'en face, respectivement. Comme la plupart des éoliennes ont une vitesse de rotation constante, la vitesse à laquelle l'extrémité de la pale tourne (la vitesse tangentielle en extrémité de pale) est normalement de quelque 64 m/s, alors qu'elle est nulle au centre de rotation, au moyeu. A 1/4 de la longueur de la

pale, loin du moyeu, la vitesse sera d'environ 16 m/s.

Les rubans jaunes situés à proximité du moyeu seront emportés plus vers l'arrière de l'éolienne que les rubans rouges fixés à l'extrémité des pales. Cela est évidemment dû au fait que, en extrémité des pales, la vitesse tangentielle est environ 8 fois plus grande que la vitesse du vent frappant le devant de l'éolienne.

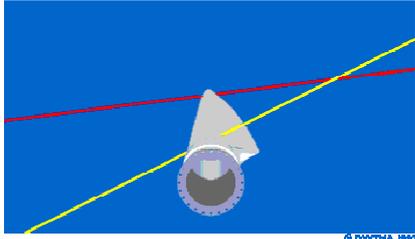
Pourquoi les pales sont-elles vrillées ?

Les pales des grandes éoliennes sont toujours vrillées.

Vu depuis la pale du rotor, le vent arrivera d'un angle d'incidence bien plus vif (par rapport à la direction générale du vent dans le paysage) au fur et à mesure que nous nous déplaçons vers la base de la pale et le centre du rotor.

Comme expliqué à la page sur le [décrochage aérodynamique](#), la pale arrête d'être entraînée par le vent si le vent la frappe à partir d'un angle d'incidence trop vif.

C'est pourquoi il faut vriller les pales de façon à avoir un angle d'incidence des filets d'air optimal pour chacune des sections de la pale. Cependant, surtout en cas d'éoliennes à pas fixes (régulées par décrochage aérodynamique), il importe que la pale soit construite de manière à décrocher graduellement depuis la base de la pale vers son extrémité en cas de vitesses de vent excessives.



Les pales du rotor

La variation de la vitesse du vent change la direction du vent par rapport à la pale du rotor

Sur l'image ci-dessus nous avons détaché la pale du moyeu. La pale est vue du côté sous le vent, depuis la base de la pale vers son extrémité. Le vent souffle à une vitesse d'entre 8 et 16 m/s dans le

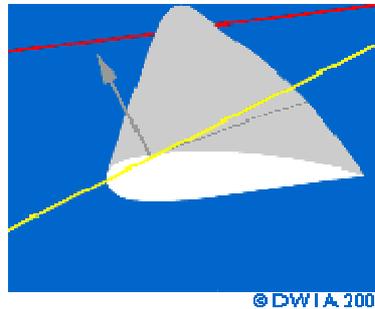
paysage environnant (depuis le bas de l'image), et l'extrémité de la pale se meut vers la partie gauche de l'image.

Sur l'animation, vous pouvez voir comment tout changement du vent a un effet bien plus remarquable sur l'angle d'attaque du vent à la base de la pale (marquée par la ligne jaune) qu'à son extrémité (marquée par la ligne rouge). Si le vent est suffisamment fort pour provoquer le [décrochage](#)

[aérodynamique](#) d'une pale, c'est donc à la base de la pale que ce phénomène commence.

La direction de la portance

Coupons maintenant la pale du rotor à la ligne jaune. Sur l'image à droite, la flèche grise montre la direction de la [portance](#) à la ligne de coupure. La portance est perpendiculaire à la direction du vent. Comme vous pouvez l'observer, la portance pousse partiellement la pale dans la direction désirée, c.-à-d. à gauche. Cependant, elle l'incline aussi un peu.



Profils de la pale du rotor (coupes transversales)

Comme vous pouvez le voir sur l'image ci-dessus, les pales du rotor d'une éolienne ressemblent beaucoup aux ailes d'un avion. En fait, les concepteurs des pales du rotor utilisent souvent les profils classiques des ailes d'un avion pour la conception de la partie la plus extrême de la pale.

Par contre, les profils épais de la partie la plus intérieure de la pale sont normalement conçus spécialement pour les éoliennes. Le choix de profils pour les pales du rotor implique toujours un certain nombre de compromis, étant donné que la pale doit avoir des caractéristiques fiables de portance et de décrochage. De même, la pale doit pouvoir bien fonctionner, même en cas de salissure de la surface de la pale (ce qui peut poser des problèmes dans les localités où il ne pleut pas beaucoup).

Matériaux de la pale

La plupart des pales modernes des grandes éoliennes sont fabriquées en plastique (polyester ou époxy) renforcé par des fibres de verre (en anglais, appelé aussi GRP - glass fibre reinforced plastics). L'utilisation de fibres de carbone ou d'aramide comme matériaux de renforcement est une autre possibilité, mais en général, une telle solution s'avérera trop chère pour les grandes éoliennes. Les matériaux composites de bois, bois-époxy ou bois-fibres-époxy n'ont pas encore pénétré le marché des pales, bien qu'on explore toujours les possibilités de leur utilisation pour la fabrication des pales. Les alliages d'acier et d'aluminium posent des problèmes de poids et de fatigue du métal, respectivement. Par conséquent, ces alliages sont actuellement seulement utilisés pour les pales très petites.

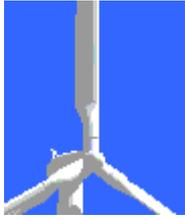
Contrôle de la puissance de l'éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15 m/s. Il est en fait inutile de concevoir des éoliennes qui maximalisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées, celles-ci étant peu fréquentes.

En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les

éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance. Il y a deux manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance d'une éolienne moderne :

Contrôle à calage variable de pale



Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura

baissé d'intensité.

Comme vous pouvez le voir sur l'image, les pales du rotor doivent donc être mobiles autour de leur axe longitudinal (c.-à-d. pouvoir varier l'angle de pas).

Vous devez cependant noter que notre animation est exagérée : Au cours d'une régulation normale, les pales pivoteront seulement d'une fraction de degré à la fois - et le rotor tournera en même temps.

Concevoir une éolienne à pas variable suppose une ingénierie très avancée afin d'assurer le positionnement exact des pales. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à assurer le meilleur rendement possible à tout moment. Le mécanisme de calage est normalement opéré par un système hydraulique.

Régulation par décrochage aérodynamique

Sur une éolienne à régulation (passive) par décrochage aérodynamique (appelée aussi une éolienne à pas fixe), les pales sont fixées au moyeu de façon rigide.

Cependant, la géométrie de la pale a été conçue de façon à mettre à profit, en cas de vitesses de vent trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant de la turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent (voir la page précédente). Ce décrochage empêche la portance d'agir sur le rotor.

Si vous avez lu la page sur [l'aérodynamique et le décrochage](#), vous savez déjà que lorsque la vitesse du vent augmente, l'angle d'attaque des pales augmentera également jusqu'à arriver au point de décrochage.

Si vous regardez attentivement la pale d'une éolienne à pas fixe, vous verrez qu'elle est légèrement vrillée autour de son axe longitudinal. En concevant la pale ainsi, on assure que le décrochage a lieu graduellement lorsque la vitesse du vent atteint sa valeur critique. (Il y a également d'autres raisons pour vriller la pale, cf. la page sur [l'aérodynamique de la pale](#).)

La régulation par décrochage aérodynamique a avant tout l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor même, ainsi qu'un système de contrôle très complexe. L'inconvénient est qu'une telle régulation ne pose pas seulement de grands défis à la conception aérodynamique des pales, mais également à la conception de l'éolienne entière afin d'éviter l'apparition de vibrations par le décrochage. Environ deux tiers des éoliennes qui sont installées actuellement dans le monde sont à pas fixe.

Régulation active par décrochage aérodynamique

Un nombre croissant des grandes éoliennes (1 MW et plus) sont conçues avec un mécanisme dit de régulation active par décrochage aérodynamique.

Du point de vue technique, ayant des pales mobiles, ces machines ressemblent à celles contrôlées à calage variable. Afin d'avoir un couple relativement élevé à des vitesses de vent faibles, ces éoliennes sont normalement programmées pour pivoter leurs pales de la même façon que les éoliennes à pas variable. (Souvent on utilise seulement un nombre limité de pas fixes, dépendant de la vitesse du vent.) Cependant, lorsque l'éolienne atteint sa [puissance nominale](#), une grande différence par rapport aux éoliennes à pas variable est à noter : si la génératrice est sur le point d'être surchargée, l'éolienne pivotera ses pales dans la direction opposée à celle dans laquelle une éolienne à pas variable l'aurait fait. En d'autres mots, au lieu de le réduire, elle augmentera l'angle d'attaque des pales du rotor pour faire décrocher les pales encore plus, perdant ainsi l'excès d'énergie du vent.

Un des atouts d'un tel système de régulation est qu'il est possible de contrôler la puissance de sortie de façon plus précise que par la régulation passive par décrochage aérodynamique, ce qui permet d'éviter une surévaluation de la puissance nominale de l'éolienne au début d'une rafale. Un autre

avantage est le fait que l'éolienne peut fonctionner presque exactement à sa puissance nominale à toutes les vitesses du vent. Une éolienne à pas fixe normale, par contre, enregistre une chute de la production de puissance électrique à des vitesses de vent élevées, au fur et à mesure que les pales décrochent de plus en plus.

Le mécanisme de calage est normalement opéré à l'aide de systèmes hydrauliques ou de moteurs électriques pas à pas.

Tout comme c'est le cas pour les éoliennes contrôlées à calage variable, c'est avant tout une question financière d'évaluer s'il vaut la peine de payer pour la plus grande complexité de l'éolienne qui résulte de l'installation du dispositif de calage des pales.

D'autres méthodes de contrôle de la puissance

Sur certaines éoliennes anciennes, des ailerons (volets) sont utilisés pour contrôler la puissance du rotor, de la même façon que les avions utilisent des volets pour changer la géométrie des ailes et obtenir une meilleure portance au moment du décollage.

Une autre possibilité théorique est d'orienter le rotor entier légèrement hors du lit du vent pour réduire la puissance. C'est cependant uniquement sur des éoliennes très petites de 1 kW ou moins que cette technique de [contrôle de puissance par l'orientation du rotor](#) est utilisée, étant donné que le rotor est exposé à des charges qui varient cycliquement risquant d'endommager la structure entière à la longue.



Le dispositif d'orientation de l'éolienne

Le dispositif d'orientation de l'éolienne est utilisé pour tourner le rotor dans la direction face au vent.

Erreur d'orientation

On dit que l'éolienne a une erreur d'orientation si le rotor n'est pas orienté perpendiculairement à la direction du vent. Une erreur d'orientation implique qu'une moindre partie de l'énergie du vent traverse la surface balayée par le rotor. (Ceux qui ont une bonne connaissance des mathématiques sauront que cette proportion diminue avec le cosinus de l'erreur d'orientation.)

Si cela était le seul résultat d'une erreur d'orientation, le dispositif d'orientation serait une manière excellente de [contrôler la puissance d'entrée](#) au rotor de l'éolienne. Cependant, la partie du rotor la plus proche de la direction du vent sera exposée à une plus grande force (couple de flexion) que le reste du

rotor. D'une part, cela signifie que le rotor tendra à s'orienter automatiquement face au vent, qu'il s'agisse d'une [éolienne face au vent](#) ou d'une [éolienne sous le vent](#). D'autre part, cela signifie également que les pales seront fléchies dans un mouvement alternatif dans la direction perpendiculaire au plan du rotor à chaque tour du rotor. Les éoliennes ayant une erreur d'orientation sont donc exposées à des [charges de fatigue](#) plus grandes celles orientées correctement dans une direction perpendiculaire au vent.

Le dispositif d'orientation

Photo Soren Krohn



© 1998 www.WINDPOWER.org

© 1998 DWIA

Sur presque toutes les [éoliennes à axe horizontal](#), une orientation forcée est utilisée - elles sont donc munies d'un dispositif qui utilise des moteurs électriques et des multiplicateurs pour assurer que le rotor soit toujours orienté face au vent.

L'image à gauche montre le dispositif d'orientation d'une éolienne de 750 kW, vue d'en bas vers la nacelle. Vous voyez la couronne du dispositif d'orientation tout à l'extrémité, et les roues dentées des

moteurs et des freins du système à l'intérieur. Pratiquement tous les constructeurs d'éoliennes face au vent préfèrent concevoir le dispositif d'orientation de façon à ce que celui-ci se bloque automatiquement lorsqu'il n'est pas en fonctionnement. Le dispositif d'orientation est activé par un contrôleur électronique qui vérifie la position de la [girouette](#) de l'éolienne plusieurs fois par minute. Compteur de la torsion des câbles



© 1998 www.WINDPOWER.org

Les câbles conduisent le courant depuis la génératrice de l'éolienne vers la base de la tour. Cependant, si par hasard l'éolienne continue de s'orienter dans le même sens pendant une longue période, les câbles finiront par être de plus en plus torsadés. Les éoliennes sont donc munies d'un compteur de la torsion des câbles qui avisera le contrôleur électronique lorsqu'il est l'heure de dérouler les câbles.

C'est pourquoi on peut parfois voir le rotor d'une éolienne qui semble s'affoler complètement, faisant cinq tours de suite dans une seule direction. Comme c'est le cas pour tout autre équipement de sécurité installé dans l'éolienne, il y a redondance, c.-à-d. des dispositifs de sécurité supplémentaires. Ainsi, l'éolienne est également munie d'un interrupteur à cordon qui est activé en cas de câbles trop torsadés.

La tour de l'éolienne

Tours d'éoliennes, la Navarre, Espagne Photo Soren Krohn



© 1999 DWIA

La tour de l'éolienne supporte la nacelle et le rotor. Il existe plusieurs alternatives pour les grandes éoliennes : une tour autoportante, tubulaire et d'acier, une tour en treillis ou bien une tour massive en béton. Les mâts tubulaires haubanés sont seulement utilisés pour les petites éoliennes (chargeurs de piles, etc.).

Tours tubulaires d'acier



La plupart des grandes éoliennes sont livrées avec une tour tubulaire d'acier, fabriquée dans des sections de 20 à 30 m qui sont munies de brides aux deux extrémités de chacune et assemblées par des boulons sur site. Les tours sont coniques (c.-à-d. avec un diamètre croissant, plus on s'approche du pied de la tour) pour augmenter la résistance tout en utilisant moins de matériau.

Photo © NEG-Micon A/S 1998

Tours en treillis



On utilise des profils d'acier soudés pour fabriquer les tours en treillis. L'atout principal d'une tour en treillis est son prix, celle-ci ne requérant que la moitié du matériau utilisé pour une tour tubulaire autoportante d'une rigidité similaire. Le plus grand inconvénient lié au choix de ce type de tour est son apparence visuelle (bien que cette question soit évidemment discutable). En tout cas, pour des raisons esthétiques, on n'utilise pratiquement plus les tours en treillis pour les grandes éoliennes.

a taille des éoliennes

Des techniciens travaillent sur la pale longue de 32 m d'une éolienne de 1,5 MW. Photo Christian Kjaer

© 2000 DWIA

La puissance de sortie augmente avec la surface balayée par le rotor

Lorsqu'un agriculteur vous indique l'extension de ses terres, il le fera

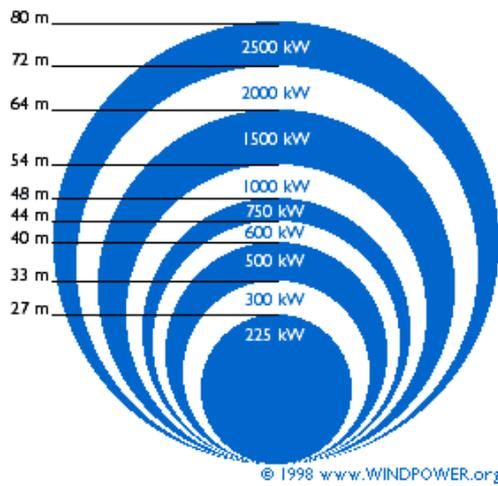
normalement en termes d'hectares. Avec les éoliennes, c'est presque la même histoire, bien que, dans le cas de l'exploitation éolienne, nous cultivons une surface verticale au lieu d'une surface horizontale.



La surface de disque balayée par le rotor (ainsi que la vitesse du vent, évidemment) détermine la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année.

L'image peut vous donner une idée des diamètres généraux du rotor, valables pour les différentes tailles d'éoliennes. Une éolienne, dont la puissance de la génératrice est de 600 kW, aura typiquement un diamètre de rotor de quelque 43 mètres. Si vous doublez le diamètre du rotor, vous obtiendrez une surface qui est quatre fois plus grande (le carré de deux). Cela signifie également une augmentation de quatre fois de la puissance de sortie du rotor.

Les diamètres de rotor peuvent varier un peu par rapport aux chiffres indiqués sur l'image, étant



donné qu'une grande partie des fabricants cherche à [optimiser les éoliennes](#) aux conditions locales prévalant sur le site en question. Une plus grande génératrice exige évidemment plus de puissance (c.-à-d. plus de vent) afin de tourner. Dans une région de vents faibles, il est donc souvent possible de maximiser la production annuelle de l'éolienne en utilisant une génératrice relativement plus petite pour un diamètre de rotor donné (ou bien un plus grand diamètre de rotor pour une génératrice donnée). Dans le cas d'une éolienne de 600 kW, les diamètres de rotor varient normalement entre 39 et 48 m. S'il est possible, sur les sites de vents faibles, d'augmenter la production annuelle d'énergie en utilisant une génératrice plus petite que normalement, c'est parce que cette solution

permet à l'éolienne de fonctionner pendant plus d'heures au cours de l'année.

Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.
2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.
3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une [tour](#) haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

Si cela vous intéresse, vous pouvez jeter un coup d'il sur les [éoliennes de la classe du mégawatt](#) dans notre galerie de photos d'éoliennes.

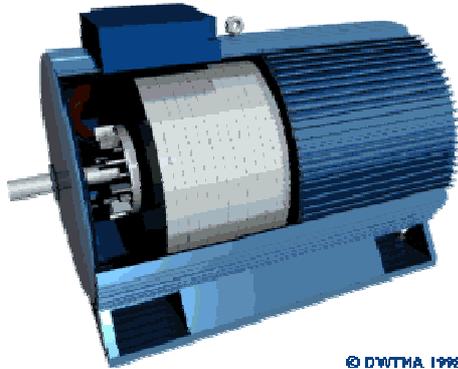
Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité sont très bas.
2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.
3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).
5. Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général

beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites. (Voir la section sur l' [impact des éoliennes sur l'environnement.](#))

La génératrice de l'éolienne

Sur l'image, vous voyez le ventilateur de refroidissement se mouvoir à l'intérieur de la génératrice. Il a été placé juste à côté du rotor qui se cache derrière le cylindre brillant d'acier magnétique, appelé aussi le stator. La surface du stator ressemble à celle d'un radiateur et sert à refroidir la génératrice. Sur une vraie génératrice, il est difficile de voir les détails clairement. C'est pourquoi nous allons



démonter une génératrice et construire des modèles simplifiés aux pages suivantes.

La génératrice convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les génératrices des éoliennes diffèrent un peu des autres types de génératrices raccordées au réseau électrique. Une des raisons pour cette différence est que la génératrice d'une éolienne doit pouvoir fonctionner avec une source de puissance (c.-à-d. le rotor de l'éolienne) qui fournit une puissance mécanique (un couple) très fluctuante.

© DWTMA 1998 Cette page - et celles qui suivront - suppose que vous avez déjà des connaissances de base de l'électricité, de l'électromagnétisme et du courant alternatif, en particulier. Si les expressions de volt (V), phase, fréquence ou Hertz (Hz) vous semblent étranges, vous devez - avant de passer aux pages suivantes - d'abord lire les pages sur le [courant alternatif](#), le [courant alternatif triphasé](#), l'[électromagnétisme](#) et l'[induction](#) incluses dans le [manuel de référence](#) de ce site.

La tension de la génération électrique

Sur les grandes éoliennes (supérieures à 100 à 150 kW), la tension générée par l'éolienne est le plus souvent un courant alternatif triphasé de 690 V (CA). Le courant est ensuite conduit à travers un transformateur situé juste à côté de l'éolienne (ou bien à l'intérieur) pour augmenter la tension à approximativement 10.000 à 30.000 V, selon le standard du réseau électrique local.

Les grands constructeurs fournissent tant des modèles d'éoliennes de 50 Hz (pour la quasi-totalité des réseaux électriques du monde) que des modèles de 60 Hz (pour le réseau électrique américain).

Le système de refroidissement

Il faut refroidir les génératrices lorsqu'elles travaillent. Sur la plupart des éoliennes, on assure ce refroidissement en enrobant la génératrice dans un conduit et en installant dans celui-ci un grand ventilateur qui refroidit l'air. Il y a cependant un petit nombre de constructeurs d'éoliennes qui à la place utilisent des génératrices refroidies par eau. Ces génératrices peuvent être construites de façon plus compacte ce qui comporte quelques avantages au niveau du rendement électrique, mais elles requièrent en même temps l'installation d'un radiateur dans la nacelle afin de se débarrasser de la chaleur provenant du système de refroidissement par liquide.

Comment démarrer et arrêter la génératrice ?

Si vous raccordez une grande éolienne au réseau (ou la débranchez) en appuyant sur un interrupteur normal, il est très probable que vous endommagerez non seulement la génératrice, mais aussi le multiplicateur et le courant du réseau dans le voisinage.

Un peu plus loin, à la page sur [la qualité de puissance](#), vous allez apprendre comment les concepteurs d'éoliennes surmontent ce défi.

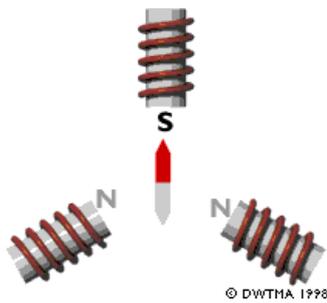
Quelle conception de la génératrice et quel raccordement au réseau choisir ?

Une éolienne peut être construite avec une génératrice synchrone ou asynchrone raccordée au réseau sous plusieurs formes, directement ou indirectement.

Raccordement direct au réseau signifie que la génératrice est raccordée directement au réseau à courant alternatif (triphase en général).

[Raccordement indirect au réseau](#) signifie que le courant produit par l'éolienne traverse une série de dispositifs électriques ajustant le courant de façon à correspondre à celui du réseau. Avec une génératrice asynchrone, un tel ajustement a lieu automatiquement.

La génératrice synchrone



Principes des génératrices (ou moteurs) triphasées

L'ensemble des génératrices (ou moteurs) triphasées utilisent un champ magnétique tournant.

Sur l'animation à gauche, nous avons installé trois électroaimants dans un cercle. Chaque électroaimant est raccordé à sa propre phase dans un [réseau électrique triphasé](#).

Comme vous pouvez le voir, chacun des [électroaimants](#) produit alternativement un pôle sud et un pôle nord vers le centre. Les lettres sont marquées en noir lorsque le magnétisme est fort, et en gris clair lorsque le magnétisme est faible. La fluctuation du magnétisme correspond

exactement à celle de la tension de chaque phase. Lorsqu'une des trois phases atteint son maximum, le courant circule dans les deux autres dans le sens inverse et à demi-tension. Comme le courant traversant chacun des trois aimants se trouve toujours décalé d'un tiers de période par rapport au précédent, le champ magnétique fera un tour entier par cycle.

Fonctionnement d'un moteur synchrone

L'aiguille aimantée (avec le pôle nord marqué en rouge) suivra le champ magnétique de façon très précise, faisant exactement un tour par cycle. Dans un réseau à 50 Hz, l'aiguille fera 50 tours par seconde, c.-à-d. 50 fois 60 = 3.000 tours par minute.

En fait, sur l'animation ci-dessus, nous avons réussi à construire ce qu'on appelle un moteur synchrone bipolaire à aimant permanent. Si l'on dit que le moteur est synchrone, c'est parce que l'aimant au centre tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique.

La raison pour laquelle on dit que c'est un moteur bipolaire est qu'il a un pôle nord et un pôle sud. Vous diriez peut-être qu'il y a plutôt trois pôles sur l'animation, mais le fait est que l'aiguille de compas est soumise à l'attraction du total des champs magnétiques autour de son propre champ magnétique. Si l'aimant tout en haut est un pôle sud fort, les deux aimants situés en bas formeront ensemble un pôle nord fort.

On dit que le moteur est à aimant permanent parce que l'aiguille de compas au centre est un aimant permanent et non un électroaimant. Vous pouvez construire un vrai moteur en remplaçant l'aiguille de compas par un aimant permanent fort, ou bien par un électroaimant qui maintient son magnétisme grâce à une bobine (roulée autour d'un noyau de fer et alimentée de courant continu).

On appelle la construction avec les trois électroaimants le stator du moteur étant donné qu'une partie du moteur reste statique, c.-à-d. au même endroit. Si l'aiguille de compas est appelée le rotor, c'est évidemment parce qu'elle effectue des rotations.

Fonctionnement d'une génératrice synchrone

Si l'aimant est forcé de tourner (au lieu de laisser le courant du réseau électrique le mouvoir), on verra qu'il fonctionne comme une génératrice, retournant du courant alternatif au réseau. (Vous devez cependant disposer d'un aimant plus fort pour pouvoir produire beaucoup d'électricité.) Plus la force (le couple) utilisée est grande, plus la production d'électricité sera importante bien que la génératrice continue à fonctionner à exactement la même vitesse, celle-ci étant déterminée par la fréquence du réseau.

Vous pouvez la débrancher complètement du réseau et créer votre propre réseau électrique triphasé en couplant des ampoules électriques aux trois bobines roulées autour des électroaimants. (Rappelez-vous le principe d' [induction magnétique](#) expliquée dans le manuel de référence de ce site.) Cependant, si vous débranchez la génératrice du réseau principal, il faudra la faire tourner à une vitesse de rotation constante afin de produire du courant alternatif à une fréquence constante. Par conséquent, avec ce type de génératrice, on optera normalement pour un [raccordement indirect au réseau](#).

Dans la pratique, des génératrices synchrones à aimants permanents sont très peu utilisées. Il y a plusieurs raisons pour cela : d'abord, les aimants permanents tendent à se démagnétiser lorsqu'ils travaillent dans les champs magnétiques puissants à l'intérieur de la génératrice. En plus, les aimants

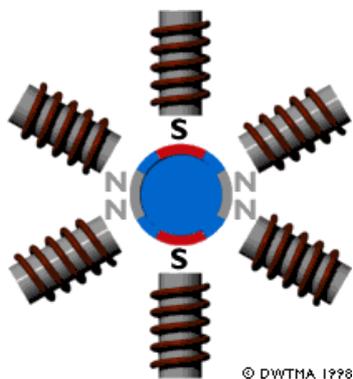
forts (fabriqués de métaux rares tels que le néodyme) coûtent assez chers, malgré la baisse des prix qui a eu lieu dernièrement.

Eoliennes avec des génératrices synchrones

Dans le rotor d'une éolienne avec une génératrice synchrone, on installe normalement des électroaimants alimentés par courant continu du réseau électrique. Comme le réseau électrique fournit du courant alternatif, il faut le convertir en courant continu avant qu'il soit envoyé aux bobines roulées autour des électroaimants du rotor.

Les électroaimants du rotor sont branchés au courant au moyen de brosses et de bagues collectrices fixées à l'arbre de la génératrice.

Changement de la vitesse de rotation de la génératrice



La génératrice tétrapolaire

Comme expliqué à la page précédente, la vitesse d'une génératrice (ou d'un moteur) raccordée directement à un réseau triphasé est constante et déterminée par la fréquence du réseau.

Cependant, en doublant le nombre d'aimants placés dans le stator, vous pouvez faire en sorte que le champ magnétique tourne à demi-vitesse.

Sur l'animation à gauche, vous voyez comment le champ magnétique tourne maintenant dans le sens des aiguilles d'une montre pendant un demi-tour avant d'atteindre le même pôle magnétique que tout à l'heure. Nous avons tout simplement raccordé les six aimants aux trois phases dans le sens des aiguilles d'une montre.

Cette génératrice (ou moteur) comporte quatre pôles à tout moment, deux pôles sud et deux pôles nord. Comme une génératrice tétrapolaire ne tourne qu'un demi-tour par cycle, elle fera 25 tours par seconde (ou 1.500 tours par minute) si elle est raccordée à un réseau à 50 Hz.

En doublant le nombre de pôles du stator d'une génératrice synchrone, nous devons également doubler le nombre d'aimants du rotor, ainsi que nous l'avons fait sur l'animation. Sinon les pôles n'iront pas bien ensemble. (Dans ce cas, nous pourrions utiliser deux aimants en forme de fer à cheval).

D'autres nombres de pôles

Il est évidemment possible de refaire ce que nous venons de faire et introduire une autre paire de pôles en installant trois électroaimants en plus dans le rotor. Avec 9 aimants, nous aurons une machine à 6 pôles qui tournera à 1.000 tours par minute dans un réseau à 50 Hz. Les résultats généraux seront les suivants :

Différentes vitesses d'une génératrice synchrone (tours par minute)

Nombre de pôles	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Le terme "vitesse de la génératrice synchrone" se réfère à la vitesse de la génératrice lorsqu'elle tourne de façon synchronisée avec la fréquence du réseau. Le tableau est donc valable pour pratiquement tous les types de génératrices. Cependant, dans le cas de génératrices asynchrones (à induction), les chiffres du tableau correspondent à la vitesse lorsque la génératrice marche à vide).

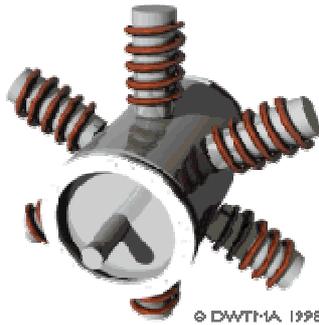
Des génératrices à faible ou à grande vitesse

La majorité des éoliennes sont munies de génératrices de 4 à 6 pôles. Les atouts des génératrices à vitesse relativement grande sont les économies qu'elles permettent de faire, tant au niveau de la taille qu'au niveau des coûts.

Le couple maximal que peut supporter une génératrice dépend du volume de son rotor. Pour une puissance de sortie donnée, il faut donc choisir entre une génératrice grande et assez chère à faible vitesse, et une génératrice plus petite (et moins chère) à grande vitesse.

La génératrice asynchrone (génératrice à induction)

L'image à droite montre les principes fondamentaux de la génératrice asynchrone, principes qui ressemblent beaucoup à ceux présentés aux pages précédentes. En fait, c'est seulement le rotor qui a l'air différent, comme vous pouvez le voir en bas de cette page.



Note : Avant de lire cette page, vous devez avoir lu les trois pages précédentes sur les [générateurs des éoliennes](#). La plupart des éoliennes du monde utilisent une génératrice asynchrone triphasée à cage (d'écureuil), appelée aussi une génératrice à induction, pour produire du courant alternatif. Ce type de génératrice n'est en fait que très rarement utilisé, sauf dans l'industrie éolienne et dans les petites centrales hydrauliques. Nonobstant, on a une assez bonne connaissance de cette technique. Le fait curieux de ce type de génératrice est qu'elle fût originalement conçue comme un moteur électrique. En fait, un tiers de la consommation mondiale d'électricité est utilisé pour faire fonctionner des moteurs à

induction qui actionnent des machines, pompes, ventilateurs, compresseurs, ascenseurs et d'autres types d'équipement requérant la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Un avantage de cette génératrice est qu'elle est très fiable et relativement peu onéreuse par rapport à d'autres types de génératrices. Elle a également quelques caractéristiques mécaniques qui la rend très appropriée pour la conversion de l'énergie éolienne ([glissement de la génératrice](#) ainsi qu'une certaine capacité de surcharge).

Le rotor à cage d'écureuil

Le composant principal de la génératrice asynchrone est le rotor à cage d'écureuil. Depuis qu'il est devenu politiquement incorrect d'exercer les animaux domestiques rongeurs dans une roue, on l'appelle



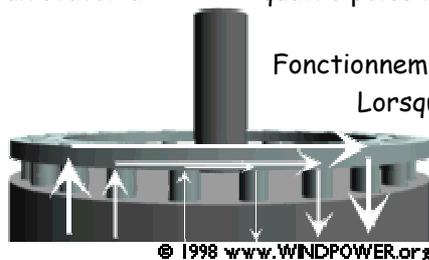
parfois seulement un rotor à cage.

C'est en fait le rotor qui distingue la génératrice asynchrone de la génératrice synchrone. Le rotor comporte un certain nombre de barreaux en cuivre et en aluminium reliés électriquement entre eux par deux cercles en aluminium situés aux deux extrémités.

Sur l'image tout en haut de la page, vous voyez le rotor muni d'un noyau de fer qui comporte plusieurs fines lames d'acier isolées avec des trous pour les barreaux conducteurs en aluminium. Le rotor est placé au centre du stator qui, également dans ce cas, est

un stator à

quatre pôles raccordé directement aux trois phases du réseau électrique.



Fonctionnement du moteur

Lorsque le courant est connecté, la machine commence à tourner comme un moteur, à une vitesse légèrement au-dessous de la vitesse synchrone du champ magnétique tournant produit par le stator.

Comment se fait-il ?

Si nous regardons les barreaux du rotor montré ci-dessus, nous avons un champ magnétique tournant qui se meut par rapport au rotor. Ce champ magnétique induit un courant fort dans les barreaux du rotor qui, eux, étant court-circuités par les deux cercles situés à leurs extrémités, n'offrent que très peu de résistance au courant.

Le rotor crée ainsi ses propres pôles magnétiques qui tour à tour sont entraînés par la force électromagnétique issue du champ magnétique tournant du stator.

Fonctionnement de la génératrice

Que se passe-t-il si on tourne manuellement le rotor à exactement la vitesse synchrone de la génératrice, à, disons, 1.500 tours par minute, comme c'était le cas pour la génératrice synchrone tétrapolaire de la page précédente ? La réponse est bien simple : rien ! Comme le champ magnétique tourne à exactement la même vitesse que le rotor, aucun phénomène d'induction ne se produira dans le rotor, et il n'y aura donc aucune interaction entre le rotor et le stator.

Par contre, si nous dépassons la vitesse de 1.500 tours par minute, le rotor tournera à une vitesse supérieure à celle du champ magnétique tournant, ce qui signifie que le stator commence à induire un

courant fort dans le rotor. Plus nous faisons tourner vite le rotor, plus grande sera la puissance transférée comme une force électromagnétique au stator et ensuite convertie en électricité.

Glissement de la génératrice

La vitesse d'une génératrice asynchrone varie en fonction du couple de rotation qui lui est appliqué. Dans la pratique, la différence entre la vitesse de rotation à la puissance maximale et celle à vide est très petite, d'environ 1 %. Cette différence exprimée en pourcentage de la [vitesse synchrone](#) est également appelée le glissement de la génératrice. Ainsi, une génératrice tetrapolaire fera 1.500 tours par minute à vide si elle est raccordée à un réseau électrique à 50 Hz. Si la génératrice fonctionne à sa puissance maximale, elle tournera à 1.515 tours par minute.

Le fait que la génératrice augmente ou diminue légèrement sa vitesse en fonction des variations du couple, est un caractéristique mécanique très utile, avant tout parce que cela réduit l'usure du multiplicateur (à cause d'une réduction du couple maximal). C'est un des atouts les plus importants liés au choix d'une génératrice asynchrone au lieu d'une génératrice synchrone pour une éolienne raccordée directement au réseau électrique.

Ajustement automatique des pôles du rotor

Avez-vous observé que nous n'avons pas indiqué le nombre de pôles du stator lorsque nous avons décrit le rotor ? Ce qui donne au rotor à cage sa finesse, c'est qu'il s'adapte automatiquement au nombre de pôles du stator. Le même rotor peut donc être utilisé avec une grande variété de nombre de pôles.

Nécessité d'un raccordement au réseau

A la page sur la [génératrice synchrone à aimants permanents](#), nous avons vu comment une telle génératrice peut fonctionner sans être raccordée au réseau électrique.

Il n'en est pas de même pour la génératrice asynchrone, son stator ayant besoin d'être alimenté en courant afin de créer le champ magnétique nécessaire pour le fonctionnement de la génératrice.

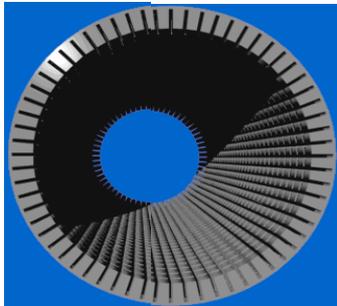
Il est cependant possible de faire fonctionner une génératrice asynchrone dans un système autonome, si elle a été munie de condensateurs fournissant le courant nécessaire pour la magnétisation. Cette solution exige également une certaine rémanence dans le fer du rotor, c.-à-d. un certain magnétisme restant, utilisé pour le démarrage de l'éolienne. Sinon il vous faudra une batterie et de l'électronique de puissance - ou bien une petite génératrice diesel - pour la mise en marche du système.

On dirait presque le ventre d'une baleine.

En réalité, le stator de la génératrice est constitué d'un très grand nombre d'électro-aimants.

Changement du nombre de pôles de la génératrice

Il paraît logique de croire qu'un stator contenant deux fois plus d'aimants coûte deux fois plus cher. Cela n'est cependant pas le cas. De toute manière, comme vous pouvez le voir sur l'image, les génératrices (et les moteurs) sont normalement conçues avec un grand nombre d'aimants dans le stator (les enroulements à bobine autour du stator ne sont pas montrés sur l'image).



On conçoit le stator ainsi pour minimiser la brèche d'air entre le rotor et le stator. En même temps, il est nécessaire d'assurer le refroidissement des aimants. En réalité, le fer du stator est constitué d'un grand nombre de minces lames d'acier isolées (d'une épaisseur de 0,5 mm) qui sont assemblées pour former le stator. Cette disposition empêche la diminution de l'efficacité de la génératrice par suite des courants de Foucault provoqués dans le fer du stator.

Le problème lié à l'augmentation du nombre de pôles d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil se limite en fait à la connexion des aimants voisins, connexion qui peut être réalisée de deux façons différentes : soit nous prenons un groupe d'aimants à la fois, les connectant à la même phase au fur et à mesure que nous nous déplaçons dans le stator, soit nous changeons à la phase suivante, chaque fois que nous arrivons à un nouvel aimant.

Génératrice à nombre de pôles variable pouvant fonctionner à deux vitesses

Quelques constructeurs équipent leurs éoliennes de deux génératrices, une petite pour les périodes de vents faibles et une grande pour celles de vents forts.

Il est cependant plus fréquent de munir les éoliennes modernes d'une génératrice à nombre de pôles variable, c.-à-d. d'une génératrice qui (selon la forme de connexion des aimants du stator) peut fonctionner avec différents nombres de pôles, et donc à une vitesse de rotation variable.

Il arrive que les génératrices sont construites selon le principe de « deux en un », ce qui leur permet de fonctionner alternativement comme p.ex. une génératrice de 400 kW ou une de 2000 kW, et à deux vitesses différentes. Cette conception est de plus en plus utilisée par les constructeurs d'éoliennes. S'il vaut la peine ou non d'employer une double génératrice ou un plus grand nombre de pôles pour les vents faibles dépend de la [distribution des vents](#) sur le site en question, et du prix supplémentaire de génératrice à pôles variable comparé au prix que le propriétaire de l'éolienne peut obtenir pour l'électricité produite (vous devez tenir en compte que le contenu énergétique des vents faibles n'est pas très élevé).

Cependant, une bonne raison pour choisir le système d'une double génératrice est le fait qu'il permet à l'éolienne de tourner à une vitesse de rotation basse lors des périodes de vents faibles. Cela améliore l'efficacité d'un point de vue aérodynamique, tout en diminuant les [nuisances sonores](#) engendrées par les pales du rotor (ce qui constitue en général uniquement un problème à des vitesses faibles du vent). Il n'est pas impossible que - sans le savoir - vous ayez déjà vu plusieurs moteurs à nombre de pôles variable à la maison : en général, les machines à laver en mesure de centrifuger les vêtements sont munies de moteurs à nombre de pôles variable leur permettant de laver le linge à une vitesse basse et de le centrifuger à une vitesse élevée. Pareillement, les hottes de cuisine sont souvent conçues pour fonctionner à deux ou trois vitesses différentes (dans le cas d'une hotte de cuisine à plusieurs vitesses, vous pouvez vous servir des connaissances que vous avez acquises sur [l'énergie du vent](#) : si vous désirez faire sortir de votre cuisine deux fois plus d'air par minute, cela vous coûtera huit fois plus d'électricité).

La génératrice à glissement variable

Pendant beaucoup d'années, les fabricants de moteurs électriques ont dû faire face au problème que leurs moteurs sont seulement en état de fonctionner à un certain nombre de [vitesses fixes](#) déterminées par le nombre de pôles du moteur.

Comme nous l'avons vu à la page précédente, le [glissement](#) du moteur (ou de la génératrice) dans une machine asynchrone (à induction) est normalement très petit pour des raisons d'efficacité, ce qui signifie que la variation de la vitesse de rotation entre la marche à vide et la pleine charge se situe autour de 1 %.

Le glissement est cependant fonction de la résistance (mesurée en ohms) dans les enroulements du rotor de la génératrice : plus grande la résistance, plus grand sera le glissement. On peut donc varier le glissement en variant la résistance du rotor. De cette façon, il est possible d'augmenter le glissement de la génératrice à p.ex. 10 %.

Sur les moteurs, ceci est normalement obtenu par l'emploi d'un rotor bobiné, c.-à-d. un rotor enroulé dans des fils de cuivre couplés en [étoile](#) et raccordés à des rhéostats variables externes, en plus d'un système de contrôle électronique destiné à actionner les rhéostats. Le couplage est normalement réalisé avec des brosses et des bagues d'entraînement, ce qui constitue un inconvénient clair par rapport à la conception simple et élégante des rotors à cage d'écureuil. Cette technique implique également l'usage de composants qui s'usent dans la génératrice - celle-ci a donc besoin de plus d'entretien que normalement.

Opti Slip®

Une variante intéressante de la génératrice asynchrone à glissement variable permet d'éviter l'emploi de bagues d'entraînement et de brosses - et donc le problème d'entretien supplémentaire.

En plaçant les rhéostats externes - ainsi que le système de contrôle - sur le rotor même, il reste toujours le problème de savoir comment communiquer au rotor la quantité de glissement nécessaire. Cette communication peut être assurée de façon très élégante en utilisant des fibres optiques pour émettre un signal à travers l'électronique du rotor, chaque fois que celui-ci passe devant un fibre optique fixe.

Fonctionnement d'une éolienne à pas et à vitesse variables

Comme mentionné à la page suivante, il y a plusieurs avantages liés à l'usage d'une éolienne à vitesse variable.

Une bonne raison pour préférer pouvoir faire fonctionner une éolienne à des vitesses variables est le processus mécanique que constitue le [le système de contrôle à calage variable de pale](#) (contrôle du couple afin d'éviter le surcharge du multiplicateur et de la génératrice en pivotant les pales de l'éolienne). Ce fait signifie que le temps de réaction du mécanisme de calage devient un facteur critique dans la conception de l'éolienne.

Cependant, si vous avez une génératrice à glissement variable, vous pouvez commencer à augmenter le glissement dès qu'elle s'approche de sa puissance nominale. La stratégie de contrôle appliquée par un des grands constructeurs danois consiste à faire fonctionner la génératrice à la moitié de son glissement maximal lorsqu'elle est près d'atteindre sa puissance nominale. En cas d'une rafale, le dispositif de contrôle signale qu'il faut augmenter le glissement du rotor afin de permettre une légère augmentation de la vitesse du rotor jusqu'à ce que le mécanisme de calage ait pivoté les pales légèrement en dehors du vent. Dès que le mécanisme de calage aura terminé son travail, le glissement peut être réduit de nouveau. En cas d'une diminution brusque de la vitesse du vent, le même processus est appliqué de façon inverse.

Bien que ces concepts puissent paraître assez simples à première vue, le fait d'assurer que les deux mécanismes de contrôle de puissance coopèrent de façon efficace constitue un vrai défi technique.

Amélioration de la qualité de puissance

On peut invoquer qu'une génératrice fonctionnant avec un glissement élevé aura une production augmentée de chaleur ce qui la rend moins efficace qu'une génératrice avec un moindre glissement. Ceci ne constitue cependant pas un problème en soi, étant donné que la seule alternative est de perdre l'énergie supplémentaire du vent en pivotant les pales hors du vent.

Un des vrais atouts de la stratégie de contrôle que nous venons de décrire est que vous obtiendrez ainsi une meilleure qualité de puissance, vu que les fluctuations de la puissance de sortie sont absorbées ou compensées par la variation du glissement de la génératrice et par le stockage ou la libération d'une partie de l'énergie en forme d'énergie rotative dans le rotor de l'éolienne.

Raccordement indirect au réseau électrique

Production de courant alternatif (CA) à fréquence variable

La plupart des éoliennes fonctionnent à vitesse quasi-constante avec raccordement direct au réseau. Cependant, si elle est raccordée indirectement au réseau, l'éolienne fonctionne dans son propre petit réseau séparé à CA, comme vous pouvez le voir sur l'image en haut. Ce réseau est contrôlé électroniquement (par l'emploi d'un inverseur) de façon à permettre la variation de la fréquence du courant alternatif dans le [stator](#) de la génératrice. Ainsi, il est possible de faire fonctionner une éolienne à une vitesse de rotation variable, ce qui signifie que l'éolienne produit du courant alternatif à exactement la même fréquence variable que celle s'appliquant au stator.

La génératrice peut être soit [synchrone](#), soit [asynchrone](#). De même, l'éolienne est souvent équipée d'un [multiplicateur](#), tout comme c'est le cas sur l'image ci-dessus. Si sa génératrice est munie de beaucoup de pôles comme expliqué à la page suivante, elle peut cependant fonctionner sans multiplicateur.

Conversion en courant continu (CC)

Le courant alternatif à fréquence variable n'est pas utilisable dans le réseau électrique public. Par conséquent, il faut d'abord le convertir en courant continu. La conversion de CA à fréquence variable en CC est réalisée par l'emploi de thyristors et de grands transistors de puissance.

Conversion en courant alternatif à fréquence fixe

Nous convertissons ensuite le courant continu (fluctuant) en un courant alternatif à exactement la même fréquence que celle du réseau électrique (par l'emploi d'un transformateur). La même conversion peut également être obtenue en utilisant des thyristors ou des transistors.

Les thyristors ou les transistors sont de grands interrupteurs semi-conducteurs fonctionnant sans pièce mécanique. Le courant alternatif obtenu par un transformateur a l'air assez difforme à première vue, ne ressemblant pas du tout à la courbe sinusoïdale douce figurant à la page sur le [courant](#)

[alternatif](#). A la place, nous obtenons toute une série de fluctuations brusques tant de la tension que du courant, justement comme vous pouvez le voir sur l'animation ci-dessus.

Filtrage du courant alternatif

Il est cependant possible d'atténuer les ondes de forme rectangulaire en faisant appel à des inductances et à des condensateurs appropriés formant un mécanisme dit de filtrage du courant alternatif. Comme expliqué ci-après, le filtrage ne permet cependant pas d'effacer complètement l'apparence ébréchée de la courbe de tension.

Avantages du raccordement indirect au réseau : vitesse variable

L'avantage principal d'un raccordement indirect au réseau est qu'il permet de faire fonctionner l'éolienne à une vitesse variable. Ainsi, il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors de rafales, tout en stockant l'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale. Cela requiert évidemment un système de contrôle très intelligent qui est en mesure de distinguer entre une vraie rafale et simplement des vitesses élevées du vent. De cette manière, on arrive à réduire le couple maximal (réduisant l'usure du multiplicateur et de la génératrice) ainsi que [les charges de fatigue](#) de la tour et des pales du rotor.

Un autre avantage est la possibilité de contrôler la puissance réactive (c.-à-d. le déphasage du courant par rapport à la tension dans le réseau de courant alternatif), améliorant ainsi la qualité de puissance du réseau électrique. Cela peut être très utile, surtout dans le cas d'une éolienne raccordée à un réseau électrique faible.

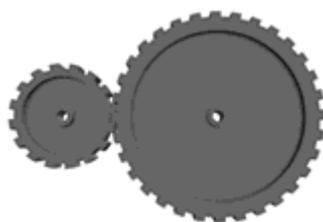
En théorie, la vitesse variable peut également comporter un léger avantage en termes de production annuelle, étant donné qu'elle permet de faire fonctionner une éolienne à la vitesse optimale de rotation selon la vitesse du vent. Cependant, d'un point de vue économique, l'avantage ainsi obtenu est si négligeable qu'il ne mérite même pas d'être mentionné.

Inconvénients du raccordement indirect au réseau

L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût. Comme nous venons de l'apprendre, l'éolienne aura besoin d'un rectificateur et de deux inverseurs, un pour contrôler le courant du stator, et un autre pour produire le courant de sortie. Actuellement, il semble que le prix de l'électronique de puissance excède les gains liés à la construction d'éoliennes plus légères, mais il est possible que cette tendance changera au fur et à mesure que le prix de l'électronique de puissance diminuera. Les statistiques sur le fonctionnement d'éoliennes utilisant de l'électronique de puissance (publiées par l'institut allemand ISET) indiquent également que la disponibilité de ces machines est un peu inférieure à celle des machines conventionnelles, à cause de défaillances de l'électronique de puissance.

D'autres inconvénients sont la perte d'énergie lors du processus de conversion CA-CC-CA ainsi que la distorsion harmonique du courant alternatif que l'électronique de puissance peut introduire dans le réseau électrique. Une distorsion harmonique se produit lorsque le processus de filtrage mentionné ci-dessus est imparfait, laissant quelques sons harmoniques (multiples de la fréquence du réseau) dans le courant de sortie.

Le multiplicateur de l'éolienne



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Pourquoi utiliser un multiplicateur ?

La puissance produite par la rotation du rotor d'une éolienne est transmise à la [génératrice](#) par toute une chaîne dynamique, c.-à-d. par l'arbre lent, le multiplicateur et l'arbre rapide, tout comme nous l'avons vu à la page citant les [principaux composants d'une éolienne](#).

Mais pourquoi, en fait, utiliser un multiplicateur ? N'est-ce pas possible d'entraîner la génératrice directement par la puissance produite par l'arbre lent ?

Si nous utilisons une génératrice ordinaire, raccordée directement à un réseau CA ([courant alternatif](#)) à 50 Hz et à trois phases avec deux, quatre ou six pôles, il nous faudrait une turbine à une vitesse extrême variant entre 1.000 et 3.000 tours par minute (voir éventuellement la page sur le [changement de la vitesse de rotation de la génératrice](#)). Avec un diamètre de rotor de 43 mètres, cela impliquera une vitesse tangentielle des pales du rotor à leur extrémité de plus de deux fois la vitesse du son - il vaut donc mieux laisser tomber cette idée tout de suite.

Une autre possibilité consiste à construire une génératrice CA à marche lente, munie d'une multitude de pôles. Mais si vous désirez raccorder votre génératrice directement au réseau, vous aurez besoin d'une génératrice à 200 pôles (c.-à-d. à 300 aimants) pour obtenir une vitesse de rotation raisonnable de 30 tours par minute.

Un autre problème est le fait que la masse du rotor de la génératrice doit être plus ou moins proportionnelle au couple (moment ou couple de torsion) que le rotor doit pouvoir supporter. De toute manière, une génératrice entraînée directement sera donc très lourde - et coûtera très chère.

Moindre couple, plus de vitesse

La solution pratique utilisée également dans beaucoup d'autres machines industrielles ainsi que dans les moteurs de voiture, consiste à installer un multiplicateur. Par l'emploi de celui-ci, il est possible de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé, produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple bas utilisée par la génératrice.

Le multiplicateur d'une éolienne ne change pas de vitesses de la même façon que la boîte de vitesse d'une voiture. Il y a normalement un rapport constant entre la vitesse de rotation du rotor et celle de la génératrice. Pour une éolienne de 600 ou 750 kW, ce rapport est typiquement approximativement de 1 à 50 tours par minute.

La photo en bas montre le multiplicateur d'une éolienne de 1,5 MW. Ce multiplicateur est un peu spécial à cause des brides situées sur la partie droite du multiplicateur (la partie à grande vitesse) et destinées à l'accouplement de deux génératrices. Les accessoires oranges que vous pouvez voir juste en dessous des brides sont les freins de secours à disque actionnés par un système hydraulique.

Derrière, vous voyez la face inférieure de la nacelle pour une éolienne de 1,5 MW.



Comme son nom l'indique, cette unité interrupteurs, pompes hydrauliques et de l'éolienne.

Avec l'augmentation de la taille des plus important que leur taux de

donc que leur tout moment.



Communication avec le monde extérieur

Le système contrôle-commande communique avec le propriétaire ou l'opérateur de l'éolienne par un lien de communication, p.ex. en transmettant des alarmes ou des demandes d'entretien par téléphone ou radio. Il rend également possible d'appeler l'éolienne afin de recueillir des statistiques et de contrôler sa condition actuelle. Dans un parc éolien, il est normal qu'une des éoliennes soit dotée d'un ordinateur permettant de contrôler et de recueillir les données des autres éoliennes du parc. On peut appeler cet ordinateur par communication téléphonique ou radio.

Communications internes

En général, on installe un système contrôle-commande et tout en bas de la tour, et à l'intérieur de la nacelle. Sur les modèles récents, la communication entre les deux systèmes est normalement assurée par des fibres optiques. L'image à droite montre une unité de communication à fibres optiques.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Le système contrôle-commande de l'éolienne
Le système de contrôle de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent sans cesse la condition de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son fonctionnement. contrôle également plusieurs soupapes situés à l'intérieur

éoliennes, il devient encore disponibilité soit très élevé, fonctionnement soit fiable à

Sur certains des nouveaux modèles, on a placé un troisième système de contrôle dans le moyeu du rotor. Cette unité communique avec le système de contrôle situé dans la nacelle par des communications en série au travers de câbles couplés par des bagues et des brosses sur l'arbre lent.

Mécanismes résistants à toute épreuve et redondance

Sur les nouvelles grandes éoliennes, les ordinateurs et les capteurs sont généralement dupliqués (redondants) dans tous les endroits requérant un haut niveau de sécurité et de stabilité dans le fonctionnement. Le contrôleur compare constamment les résultats des mesures effectuées partout dans l'éolienne afin d'assurer que tant les capteurs que les ordinateurs fonctionnent correctement. La photo en haut de la page montre le système contrôle-commande d'une éolienne de la classe du mégawatt, muni de deux ordinateurs principaux (nous avons enlevé le cache de l'un des deux ordinateurs pour vous montrer l'électronique qui y est contenue).

Que surveille-t-on ?

Il est possible de surveiller ou de régler entre 100 et 500 paramètres différents dans une éolienne moderne. Le système contrôle-commande vérifie p.ex. la vitesse de rotation du rotor, la génératrice, la tension et l'intensité du courant de celle-ci. En outre, on peut enregistrer les foudres et leur charge. Il est également possible d'obtenir des informations sur la température de l'air en dehors de l'éolienne, la température dans les armoires électroniques, la température de l'huile du multiplicateur, la température des enroulements de la génératrice, la température des paliers du multiplicateur, la pression hydraulique, l'angle de pas de chaque pale du rotor (en cas d'éoliennes à pas variable ou à contrôle actif par décrochage aérodynamique), l'angle d'orientation (en comptant le nombre de dents sur la couronne du dispositif d'orientation), le nombre de torsions des câbles, la direction du vent, la vitesse du vent, la force et la fréquence des vibrations dans la nacelle et les pales du rotor, l'épaisseur des garnitures des freins, si la porte de la tour est ouverte ou fermée (système d'alerte), etc.

Stratégies de contrôle

Beaucoup des secrets de fabrication des constructeurs d'éoliennes concernent l'interaction entre le système contrôle-commande et les autres composants de l'éolienne. En fait, une grande partie de l'augmentation du rendement des éoliennes qui a eu lieu ces dernières années, est due à l'amélioration des stratégies de contrôle.

Une stratégie intéressante poursuivie par certains des constructeurs consiste à adapter la stratégie opérationnelle au régime local des vents. De cette façon, il est p.ex. possible de minimiser l'usure peu rentable de la machine pendant les (rares) périodes de gros temps.



Contrôle de la qualité de puissance

La plupart des gens pensent au système contrôle-commande comme l'unité qui fait fonctionner l'éolienne, la démarre, l'orientant dans la direction face au vent, vérifiant le bon fonctionnement des systèmes de sécurité, etc. Le contrôleur fait en effet toutes ces choses, mais il surveille également la qualité du courant généré par l'éolienne.

Le raccordement au réseau et la qualité de puissance

Dans la section sur la [qualité de puissance](#), vous apprendrez que les compagnies d'électricité exigent que les éoliennes soient raccordées seulement au réseau et que le courant alternatif et la tension se meuvent de façon synchronisée.

Sur la photo à droite, vous voyez la section à haute tension d'un système contrôle-commande conçu pour une éolienne de la classe du mégawatt. Cette

partie du système actionne entre autres les [thyristors](#) qui assurent un couplage souple au réseau électrique.



Contrôle de puissance réactive

La tension et l'intensité du courant est typiquement mesurées 128 fois par cycle du courant alternatif (c.-à-d. 50 x 128 fois par seconde ou 60 x 128 fois par seconde, selon la fréquence du réseau). A base de ces mesures, un processeur dit DSP calcule la stabilité de la fréquence du réseau ainsi que la puissance active et réactive de l'éolienne (la

puissance réactive est avant tout la question de savoir si la tension et le courant sont en phase ou non). Afin d'assurer une bonne qualité de puissance, le système contrôle-commande peut connecter ou déconnecter un grand nombre de condensateurs électriques ajustant la puissance réactive (c.-à-d. l'angle de phase entre la tension et le courant). Comme vous pouvez le voir sur la photo à gauche, la batterie de condensateurs commutables constitue en soi une assez grande unité de contrôle dans une éolienne de la classe du mégawatt.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Compatibilité électromagnétique

Dans une éolienne, on trouve des champs électromagnétiques très puissants autour des câbles et de la génératrice. Cela signifie qu'il faut chercher à insensibiliser l'électronique du système de contrôle aux champs électromagnétiques.

Inversement, il faut éviter que l'électronique émette des radiations électromagnétiques susceptibles de gêner le fonctionnement d'autres parties de l'équipement électronique. La photo vous montre une salle complètement libérée de radiation et entourée de murs en métal, située dans le laboratoire d'un des plus grands constructeurs d'éoliennes. L'équipement de la salle est utilisé pour mesurer les émissions électromagnétiques des composants du système contrôle-commande.

Eoliennes à axe horizontal ou à axe vertical ?

Eoliennes à axe horizontal

La plus grande partie de la technologie éolienne décrite dans ces pages se réfère aux éoliennes à axe horizontal.

La raison est bien simple : toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (c.-à-d. un arbre principal horizontal).

La finalité du rotor est évidemment de convertir le mouvement linéaire du vent en énergie rotative susceptible d'entraîner une génératrice. Les turbines hydrauliques sont construites selon ce même principe fondamental, le courant d'eau étant parallèle à l'axe de rotation des aubes de la roue.

Eoliennes à axe vertical

EOLE 4, une éolienne de Darrieus à axe vertical de 4.200 kW et avec un diamètre de rotor de 100 m, est située à Cap Chat, Québec, Canada. L'éolienne (qui est la plus puissante éolienne du monde) n'est plus en fonctionnement. Photo Soren Krohn

© 1997 DWIA



Comme vous vous rappelez peut-être, les roues hydrauliques classiques sont construites de façon à laisser arriver l'eau perpendiculairement à l'axe de rotation de la roue.

Dans ce sens, les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques. En fait, certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal, mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice.

La seule éolienne à axe vertical qui ait jamais été fabriquée commercialement est l'éolienne de Darrieus, nommée d'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui breveta la conception en 1931. La compagnie américaine FloWind fabriqua l'éolienne jusqu'à son faillite en 1997. L'éolienne de Darrieus est caractérisée par ses pales de rotor en forme de C qui la font ressembler un peu à un fouet à oeufs. Elle est normalement construite avec deux ou trois pales.

Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- 1) Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- 2) Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- 1) Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol. Le prix d'omettre une tour est donc des vents très faibles sur la partie inférieure du rotor.
- 2) L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- 3) L'éolienne ne démarre pas automatiquement. (Ainsi, il faut p.ex. pousser les éoliennes de Darrieus pour qu'elles démarrent. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
- 4) Pour faire tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées intensivement.
- 5) Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor. Ceci vaut tant pour les éoliennes à axe vertical que pour celles à axe horizontal, mais dans le cas des premières, cela implique un véritable démontage de l'éolienne entière. (C'est bien pour cela que l'éolienne EOLE 4 de la photo n'est plus en fonctionnement).

éoliennes face au vent ou sous le vent ?

Eoliennes face au vent

Comme son nom l'indique, le rotor d'une éolienne face au vent est orienté dans la direction du vent. L'avantage principal de la conception face au vent est qu'on évite ainsi que l'abri créé derrière la tour influe sur la production de l'éolienne. La grande majorité des éoliennes sont en effet conçues de cette façon.

Un certain effet d'abri est cependant également créé devant la tour, ce qui fait que le vent commence à dévier bien avant qu'il n'arrive à la tour, même lorsque celle-ci est ronde et lisse. En conséquence, chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour, il y aura une légère diminution de la production de puissance de l'éolienne.

L'inconvénient principal des éoliennes face au vent est que le rotor doit être non- flexible et placé à une certaine distance de la tour. En plus, il est primordial de munir une éolienne face au vent d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours tourné vers le vent.

Eoliennes sous le vent

Petite éolienne sous le vent (22 kW). Notez que les pales sont détournées de la tour sous l'influence du vent Photo Soren Krohn

© 1998 DWIA



Sur les éoliennes sous le vent, le rotor est placé du côté sous le vent de la tour. Théoriquement, ces éoliennes ont l'avantage de ne pas avoir à être munies d'un mécanisme d'orientation - à condition que le rotor et la nacelle aient été conçus de telle manière que la nacelle s'oriente passivement selon les changements de la direction du vent. Pour les grandes éoliennes, un tel avantage est cependant assez douteux vu qu'on aura tout de même besoin de câbles pour transmettre au réseau le courant produit par la génératrice de l'éolienne. Sans mécanisme d'orientation, comment assurer alors la détorsion des câbles, lorsqu'une éolienne s'est orientée passivement dans la même direction au cours d'une longue période ? (L'emploi de bagues d'entraînement n'est pas une bonne solution quand on travaille avec des

courants de 1.000 ampères.)

Un plus grand atout des éoliennes sous le vent est le fait qu'une telle conception permet l'emploi d'un rotor moins rigide ce qui comporte certains avantages, tant à l'égard du poids que de la dynamique structurale de la machine. Ainsi, les flexions naturelles des pales à des vitesses de vent élevées enlèvent automatiquement une partie de la charge à laquelle la structure est exposée. L'avantage fondamental des machines sous le vent est donc qu'il est possible de les construire plus légères que les éoliennes face au vent.

L'inconvénient fondamental d'une éolienne sous le vent est la variation de la production d'électricité provoquée par le passage du rotor à travers l'ombre de la tour, variation qui risque d'augmenter sensiblement les charges de fatigue sur une telle éolienne par rapport à celles que subit une éolienne face au vent.

Combien de pales ?

Pourquoi pas un nombre pair de pales ?

Les ingénieurs évitent aujourd'hui de construire de grandes éoliennes avec un nombre pair de pales, surtout pour des raisons de stabilité. Un rotor constitué d'un nombre impair de pales (trois au minimum) ressemble à un disque lorsqu'on calcule les propriétés dynamiques de l'éolienne. Dans le cas d'une éolienne à structure rigide, il y aura des problèmes de stabilité si le rotor a un nombre pair de pales : au moment même où la pale supérieure fléchit légèrement vers l'arrière, atteignant le point le plus extrême du disque balayé et captant ici la puissance maximale du vent, la pale inférieure traverse la zone d'abri créée juste devant la tour.

La conception tripale danoise



La plupart des éoliennes modernes sont tripales, le rotor étant maintenue dans une position face au vent (c.-à-d. du côté de la tour exposé au vent) par un [mécanisme d'orientation](#) actionné par des moteurs électriques. On appelle normalement cette construction la conception danoise classique, et elle tend aujourd'hui à constituer le standard d'après lequel les conceptions alternatives sont jugées. La grande majorité des éoliennes vendues sur le marché mondial sont effectivement de cette conception. Les principes fondamentaux furent d'abord introduits par [l'éolienne de Gedser](#), construite

en 1956.

Un autre caractéristique de la conception danoise est l'emploi d' [une génératrice asynchrone](#). Vous pouvez lire plus sur cette conception dans la section d' [articles](#) incluse dans la version anglaise de ce site.

Conception bipale (avec un rotor basculant)



Le grand avantage des éoliennes bipales par rapport à leurs cousines tripales est le fait qu'elles permettent d'économiser le coût d'une pale de rotor, ainsi que le poids de celle-ci bien évidemment. Les éoliennes bipales ont cependant eu certaines difficultés à pénétrer le marché, entre autres parce qu'il leur faudra une vitesse de rotation bien plus élevée pour produire la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripale, ce qui constitue un inconvénient tant à l'égard du bruit que de l'impact visuel. Ces derniers temps, plusieurs fabricants d'éoliennes bipales ont donc choisi de passer à la production

d'éoliennes tripales.

La conception d'une éolienne mono- ou bipale est en fait très complexe vu qu'elle doit être munie d'un rotor basculant comme celui que vous voyez sur l'animation à droite : le rotor doit pouvoir basculer pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour de l'éolienne. Le rotor est donc monté sur un arbre, perpendiculaire à l'arbre principal



et tournant avec celui-ci. En outre, cette disposition requiert parfois des amortisseurs de choc supplémentaires afin d'empêcher les pales du rotor d'entrer en collision avec la tour.

Conception monopale



Eh oui, il existe également des éoliennes mono pales, et elles permettent effectivement d'économiser le coût d'une pale de plus ! Une chose est sûre : s'il est possible de construire quelque chose, les ingénieurs vont assurément tenter le coup ! Toutefois, les éoliennes mono pales commerciales sont assez rares, pour les mêmes raisons que celles citées

ci-dessus, les problèmes étant cependant encore plus prononcés que dans le cas des éoliennes bipales.

Outre une vitesse de rotation plus élevée et des problèmes de bruit et d'impact visuel, l'inconvénient de ce type d'éolienne est que, pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale. Cette disposition annule évidemment les économies de poids que l'on peut faire en dotant l'éolienne d'une seule pale au lieu de deux.

Optimisation des éoliennes

Pensées générales sur l'optimisation et le rendement



L'état de Victoria dans le sud de l'Australie n'aurait jamais été peuplé à la fin du XVIII^e siècle, s'il n'y avait pas eu des moulins à vent pompant de l'eau (et la conception des moulins de la photo a vraiment été optimisée à cette fin). Photo Soren Krohn

© 1998 DWIA



Les moulins à vent destinés au pompage d'eau, comme celui que vous voyez sur la photo à gauche, se distinguent beaucoup des éoliennes modernes de grande puissance. Mais ils ont été conçus de façon assez intelligente pour la fin à laquelle ils sont destinés : le rotor très solide constitué d'une multitude de pales assure que le moulin fonctionne même à des vents très faibles, et donc qu'une certaine quantité d'eau est pompée durant toute l'année.

Par contre, il est évident que ces moulins ne sont pas efficaces à des vitesses de vent élevées où il faudra les arrêter et les orienter hors du vent afin d'éviter un endommagement de la structure entière à cause de la grande

solidité du rotor. Mais ce fait ne constitue pas un problème réel : les propriétaires de ce type de moulin n'ont évidemment aucun intérêt à ce que leurs moulins vident complètement les puits et inondent les réservoirs d'eau pendant un orage.

La conception idéale d'une éolienne n'est pas dictée par la technologie seule, mais par une combinaison de considérations technologiques et économiques. Les constructeurs cherchent à optimiser leurs éoliennes de sorte qu'elles produisent de l'électricité au moindre coût possible par kilowattheure (kWh).

Par contre, les fabricants ne se préoccupent pas beaucoup de la question de savoir s'ils exploitent les ressources éoliennes de façon efficace : en fin de compte, le combustible est gratuit !

En fait, ce n'est pas nécessairement une bonne idée de maximiser la production énergétique annuelle, si cela signifie la construction d'une éolienne extrêmement coûteuse. Dans les sections suivantes, nous étudierons de plus près certains des choix auxquels les constructeurs doivent faire face.

Rapport relatif entre la taille de la génératrice et celle du rotor

Il faudra moins de force pour faire tourner une petite génératrice (avec une puissance nominale en kW peu élevée) qu'une grande. Si vous utilisez une petite génératrice et un grand rotor, l'éolienne produira de l'électricité pendant un grand nombre d'heures au cours de l'année. Par contre, elle ne captera qu'une moindre partie de l'énergie contenue dans le vent à des vitesses de vent élevées.

Une grande génératrice, en revanche, sera très efficace à des vitesses de vent élevées, alors qu'elle n'est pas en mesure de fonctionner lorsque le vent est faible.

Il va donc de soi que les constructeurs prennent en considération la distribution des vents et leur contenu énergétique à des vitesses différentes, avant de déterminer le rapport idéal entre la taille du rotor et celle de la génératrice sur un site donné.

Il est parfois avantageux de munir une éolienne de deux génératrices (ou plus), mais la question de savoir si cela vaut le coup dépend du prix du kWh payé par la compagnie d'électricité.

Hauteur de la tour

A la page sur le [cisaillement du vent](#), vous avez appris qu'une manière d'augmenter la production d'énergie d'une éolienne est d'utiliser une tour plus haute.

Si, d'un point de vue économique, il vaut la peine ou non d'opter pour une augmentation de la hauteur de la tour dépend tant de la classe de rugosité du terrain en question, que du prix de l'électricité payé au propriétaire de l'éolienne.

Pièges dans l'analyse des coûts de l'énergie éolienne

De nombreuses études sur les coûts de l'énergie éolienne ou d'autres énergies renouvelables ne sont en fait que de la science médiocre, les auteurs faisant preuve d'une connaissance insuffisante de la technologie en question ou de la théorie économique impliquée. Souvent, les spécialistes en économie ne comprennent pas la technologie, et vice-versa - et parfois ni l'une ni l'autre !

Cette page vous avertit contre les pièges les plus fréquents. Même les économistes formés tombent parfois dans ces pièges, et il n'est malheureusement pas exceptionnel de voir des comparaisons trompeuses entre les coûts de différentes technologies d'énergie.

Quels sont les coûts liés à la production d'électricité éolienne ?

1. Amortissements économiques de l'investissement
2. Intérêt sur le capital investi
3. Frais d'exploitation et d'entretien

Si vous pensez que le montant nécessaire pour acheter une éolienne représente un coût ou une dépense, vous vous trompez et ne comprenez ni les principes de comptabilité ni l'économie. Dans ce cas, il vaut mieux de ne pas vous lancer dans une analyse des coûts! Le bénéfice, lui, n'est pas non plus un coût. Si c'est bien ce que vous croyiez, ne continuez pas à lire cette page - de toute manière pas avant d'avoir pris un cours élémentaire d'économie pour bien comprendre les mécanismes.

Amortissements

Les amortissements économiques de votre investissement sont impossibles à apprécier à moins que vous ne connaissiez d'avance le rendement de l'investissement. Beaucoup de gens, y compris certains économistes, trouvent ce fait surprenant. Mais les amortissements sont par définition la diminution de la capitalisation (valeur en capital) en utilisant le taux d'intérêt interne comme facteur d'actualisation. Si vous ne connaissez pas le revenu de l'investissement, vous ne connaissez pas non plus son intérêt interne - et vous n'êtes donc pas en mesure de calculer les amortissements économiques.

L'erreur réside dans le fait que les notions d'amortissements fiscaux et d'amortissements comptables sont confondues avec les amortissements économiques. Mais les amortissements fiscaux ou comptables ne sont que des jeux de règles techniques qui ne sont pas utilisés lorsqu'on calcule les coûts liés la production d'énergie.

Les prix et les coûts sont deux notions différentes

De nombreux non-économistes utilisent à tort les notions de frais/coûts et de prix comme des synonymes. Le prix d'un produit se détermine en fonction de l'offre et de la demande. Beaucoup de gens assument naïvement que le prix d'un produit est déterminé en additionnant un bénéfice normal ou raisonnable à un coût. Mais ceci n'est pas du tout le cas - à moins qu'il ne s'agisse d'un monopôle contrôlé par le gouvernement.

Le prix d'une éolienne ne peut pas être calculé en divisant le chiffre d'affaires par le volume des ventes.

Certains pensent qu'il est possible de calculer le prix par MW de capacité éolienne installée en divisant les chiffres d'affaires des fabricants par leur vente en MW. Mais les résultats ainsi obtenus sont un pur non-sens. Ceci est dû à plusieurs causes, entre autres:

1. Certaines livraisons des fabricants sont des projets complets clef en main, comprenant planification, nacelles, rotors, tours, fondations, transformateurs, multiplicateurs ainsi que d'autres frais d'installation, y compris la construction de voies d'accès et l'établissement de lignes électriques ; d'autres livraisons comprennent seulement les nacelles, en passant par toutes les autres combinaisons possibles. Les chiffres d'affaires des fabricants incluent également le service et la vente de pièces de rechange.
2. Le chiffre d'affaires des fabricants comprend les recettes en provenance de licences, mais les MW correspondant ne sont pas enregistrés dans les comptes des entreprises.
3. Le chiffre d'affaires peut varier significativement d'un marché à un autre. Ainsi, le prix d'une éolienne pour vents forts est très différent de celui d'une éolienne pour vents faibles.
4. Les modèles de vente, les types d'éoliennes et les types de contrats varient sensiblement et sans systématique d'une année à une autre.

A la place, pour étudier les prix des éoliennes, vous devez consulter les listes des prix. Il est cependant inutile de simplement y prendre la moyenne des prix indiqués, étant donné que certains modèles ne sont pratiquement pas vendus alors que d'autres sont très populaires. Egalement, cela n'a aucun sens de prendre la moyenne des prix des éoliennes de p.ex. 1.000 kW, même si leurs tours sont toutes de la même hauteur. Comme expliqué dans l'une des sections suivantes, cela donne bien plus de sens d'étudier le prix par mètre carré de surface balayée par le rotor.

La productivité et les coûts dépendent du prix de l'électricité, et pas vice-versa

La production annuelle par mètre carré de surface balayée est normalement bien plus élevée au Danemark qu'en Allemagne, par exemple. A la rigueur, cette différence n'est pas due aux variations du potentiel éolien qui existent entre les deux pays, mais aux prix différents payés pour l'électricité d'origine éolienne. Au Danemark, il n'est tout simplement pas rentable d'installer des éoliennes dans des zones peu ventées, alors que ceci est bien le cas en Allemagne, grâce à un prix d'électricité plus élevé.

En Allemagne, les prix payés pour l'électricité en provenance d'énergies renouvelables sont très élevés (prix de l'électricité par kWh d'énergie livrée au réseau électrique) ce qui rend rentable d'installer des éoliennes sur des tours très hautes. Le prix élevé payé pour l'électricité d'origine éolienne rend également rentable l'implantation d'éoliennes dans des zones peu ventées. Dans ce cas, le rapport du diamètre de rotor à la puissance de la génératrice des éoliennes les plus rentables est normalement plus grand que dans d'autres régions du monde.

Si l'on regarde le prix par kW de puissance installée, les éoliennes vendues sur le marché allemand peuvent donc paraître plus chères que celles vendues sur d'autres marchés. Mais de telles statistiques sont en fait trompeuses, vu qu'il s'agit en réalité de machines optimisées pour les zones allemandes peu ventées. C'est le prix par mètre carré de surface balayée par le rotor qui est décisif, et non pas le prix par kW de puissance électrique installée. Voir les sections qui suivent pour une explication plus détaillée.

Variations des frais d'installation

L'idée que vous aurez en regardant les frais d'installation peut, elle aussi, être trompeuse. Ce qui peut sembler bizarre dans ce cas, c'est que le fait d'avoir des frais d'installation importants n'implique pas forcément que les coûts de la production électrique sont élevés, eux aussi. Tout au contraire : on voit souvent que, lorsque les ressources éoliennes sont excellentes (assurant de faibles coûts de production électrique), les investisseurs sont prêts à payer des frais d'installation élevés pour monter un projet éolien dans une zone isolée.

Dans le pays de Galles, les frais d'installation tendent à être très élevés (dépassant ceux du Danemark de plusieurs centaines de pour cent) bien que le prix de l'électricité soit très bas. Mais ceci est compensé par la présence d'une ressource éolienne très abondante, surtout au sommet des collines galloises bien arrondies (voir la page sur l' [effet de colline](#)). Par conséquent, il est souvent profitable de construire des fondations chères ainsi qu'un parcours coûteux à travers les marais de sphaignes pour exploiter les ressources éoliennes dans une zone très ventée. Ou autrement dit : lorsque les ressources éoliennes sont excellentes, on a justement les moyens de payer des frais d'installation élevés.

Dans certains cas, les frais d'installation comprennent les coûts d'élargissement et/ou de renforcement du réseau. Comme la pose de câbles coûte assez cher, la situation d'un futur parc éolien par rapport à une ligne existante à moyenne tension (9 à 30 kV) joue un rôle non négligeable dans l'évaluation de la rentabilité du projet.

Baser vos calculs sur la moyenne des frais d'installation n'a donc aucun sens, à moins qu'il ne s'agisse de zones avec des régimes éoliens très similaires, le même prix de kWh d'électricité fournie au réseau et la même distance au réseau électrique.

L'énergie éolienne est une technologie basée sur l'extraction d'une ressource naturelle. Beaucoup de gens posent la question : "Quels sont les coûts moyens de l'énergie éolienne ?" - une question qui est aussi dépourvue de sens que de demander : "Quels sont les coûts moyens du pétrole brut ?"

Au Koweït, les coûts se situent peut-être autour de 1 USD le baril alors que, en Norvège, ils peuvent s'élever jusqu'à 15 USD le baril. Si les coûts diffèrent autant, c'est qu'il est bien plus difficile d'extraire du pétrole dans la mer du Nord qu'au Koweït. Cela n'a donc aucun sens de prendre la moyenne des coûts liés à la production de pétrole au Koweït et en Norvège respectivement, pour essayer d'estimer un coût moyen général. Et de toute façon, cette moyenne ne sera jamais un indicateur fiable du prix de pétrole brut ! Même si le prix du marché tombe en dessous de 15 USD le baril, il reste peut-être toujours rentable d'extraire du pétrole dans la mer du Nord, le facteur décisif n'étant pas les coûts moyens par baril de pétrole, mais plutôt le coût marginal variable (c.-à-d. le coût d'extraction du prochain baril de pétrole).

L'usage de statistiques d'une région n'est pas un indicateur fiable des coûts dans une autre

Les coûts de l'énergie éolienne en Allemagne sont importants parce que le prix de l'électricité y est élevé. En Grande-Bretagne, les coûts de l'énergie éolienne sont peu élevés parce que le prix de l'électricité y est bas. Et évidemment, il y a moins d'éoliennes installées dans les pays où le prix de l'électricité est bas, vu que les zones bien ventées sont peu nombreuses ce qui rend plus difficile de trouver des sites rentables.

Le prix par kW de puissance installée est un très mauvais indicateur de la rentabilité de l'énergie éolienne. Ce qui compte, c'est le prix par mètre carré de surface balayée par le rotor

Les chercheurs s'intéressant à la baisse des coûts de l'éolien désirent souvent étudier la baisse des prix des éoliennes. Ils demandent donc une statistique apparemment simple : le prix des éoliennes par kW de puissance installée. Ce chiffre est normalement difficile à obtenir - et de toute façon, il est - pour plusieurs raisons - un très mauvais indicateur du développement des coûts.

Comme le prix d'une éolienne varie bien plus avec le diamètre du rotor qu'avec la puissance nominale de la génératrice, il est très difficile d'indiquer le prix par kW de puissance installée avec un seul chiffre. La raison est que la production annuelle dépend beaucoup plus du diamètre de rotor que de la puissance de la génératrice. Les études comparant le prix moyen par kW de puissance installée pour différentes technologies sont donc en général fallacieuses si elles incluent l'énergie éolienne.

Le non-sens systématique du kW - un exemple

Pour illustrer pourquoi il est erroné d'utiliser le prix par kW de puissance installée, nous essayons de comparer, à titre d'exemple, la production annuelle d'énergie de deux éoliennes du même fabricant, les deux installées sur une tour de 50 m de hauteur. (La première est une machine pour vents forts, l'autre est une machine universelle.) Vous pouvez utiliser le [programme de calcul de la production d'énergie](#) pour contrôler les résultats:

1. Vestas V39, une éolienne de 600 kW avec un diamètre de rotor de 39 m
2. Vestas V47, une éolienne de 660 kW avec un diamètre de rotor de 47 m

Ce que l'on découvre en comparant les deux machines, c'est que la production annuelle de la deuxième éolienne est supérieure de 45,2 % à celle de la première, bien que la génératrice de la deuxième éolienne soit seulement 10 % plus grande. Si, par contre, nous comparons les deux surfaces balayées, nous voyons que la surface balayée de la deuxième éolienne est exactement 45,2 % plus grande que celle de la première.

Donc, si nous supposons que le prix de la deuxième éolienne est 33 % plus élevé que celui de la première, vous obtiendrez des résultats très différents:

1. Le prix par kW de puissance nominale a augmenté de 21 %
2. Le prix par mètre carré de surface balayée a diminué de 8,4 %
3. Le prix par kWh d'énergie a diminué de 8,4 %

Les nouvelles éoliennes sont de plus en plus souvent construites avec un système de contrôle à [calage variable de pale](#) plutôt qu'avec un contrôle par [décrochage aérodynamique](#). Cela permet en fait de varier plus librement la taille de la génératrice par rapport à celle du rotor. En général, on tend aujourd'hui à employer des diamètres de rotor de plus en plus grands pour une taille de génératrice donnée. Ce fait a pour conséquence que l'on obtient un développement de prix complètement faux (et surestimé) en comparant le prix par kW de puissance installée des vieilles éoliennes avec celui des récentes. La mesure de prix à utiliser est le prix par mètre carré de surface balayée - et non pas le prix par kW de puissance (nominale) installée.

Erreurs de facteurs de capacité

Les analystes s'intéressent fréquemment au facteur de capacité de l'énergie éolienne. Dans le cas d'une technologie de génération électrique, le facteur de capacité est égal à la production annuelle d'énergie divisée par la production théorique maximale, c.-à-d. celle que l'éolienne aurait eue si la génératrice fonctionnait à sa puissance nominale pendant toute l'année.

Dépendant des statistiques éoliennes pour un site donné, le facteur de capacité idéal pour une éolienne se situe autour de 25 à 30 %, vu qu'un tel facteur tend à minimiser le coût du kWh. Contrairement à ce qui est le cas des technologies nécessitant du combustible non gratuit pour fonctionner, il n'est

absolument pas désirable d'augmenter le facteur de capacité d'une éolienne. Ce paradoxe apparent du facteur de capacité est expliqué plus en détail à la page sur la [Production annuelle d'énergie d'une éolienne](#).

Les facteurs de capacité sont très différents pour les différentes éoliennes (cf. l'exemple antérieur), mais le prix (ou les coûts) sont également très différents. En fin de compte, ce qui compte est le coût du kWh d'énergie produite, et non pas le facteur de capacité.

La rente foncière dépend de la rentabilité du projet - et non le contraire

C'est une faute très commune de considérer la compensation des propriétaires des terres où sont situées les éoliennes comme un coût de l'énergie éolienne. En fait, c'est seulement une petite partie de la compensation qui représente un véritable coût : la perte de récolte sur le terrain qui ne peut plus être cultivé, ainsi qu'une possible compensation de nuisance dans le cas où l'agriculteur serait obligé de faire des tours supplémentaires pour labourer le champ en dessous des éoliennes.

Si la compensation excède celle qui est normalement payée lors de l'installation d'un pylône à haute tension, l'excédent est en réalité un transfert de revenus ce qui est considéré comme une valeur complètement différente par les économistes. Il ne s'agit là non pas d'un coût social, mais d'un transfert de revenus (profit) du propriétaire de l'éolienne au propriétaire de la terre. Les économistes appellent un tel transfert une rente foncière. Un paiement de rente foncière ne transfère aucune ressource réelle d'un emploi à un autre.

Parfois, certaines personnes désirent connaître la compensation normale en cas d'implantation d'une éolienne sur un terrain agricole, mais le fait est qu'il n'existe aucune compensation "normale", la compensation étant déterminée par la qualité du site. S'il y a beaucoup de vent et un accès bon marché au réseau électrique à proximité, le propriétaire de la terre peut obtenir un prix élevé étant donné que le propriétaire de l'éolienne en aura les moyens grâce à la haute rentabilité du site. Par contre, si le site est seulement peu venté et/ou que les frais d'installation sont élevés, la compensation ne correspondra qu'à la valeur de nuisance causée par l'éolienne.