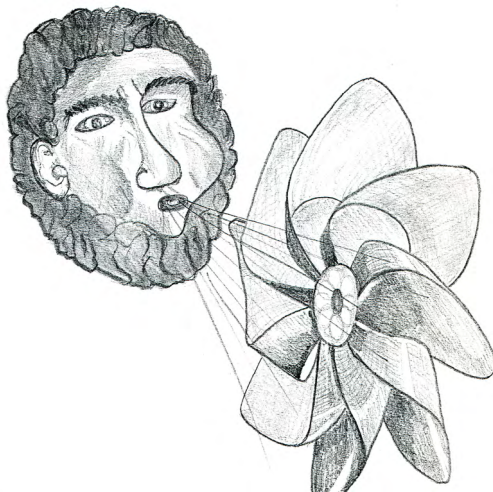


L'énergie éolienne



Sommaire

A deme	4	Comité de liaison	Énergie verte	
Aérodynamique	5	énergies renouvelables	29	ou énergie renouvelable 50
Aérogénérateur	7	Contrat de maintenance	30	Engrenage 51
ALE : Agence locale		Contrôle du fonctionnement		Éole 53
de l'énergie et du climat	9	d'une éolienne	31	Éolienne à pompage 55
Alternateur	10	Couleur	32	Éolienne domestique 57
Anémomètre	11	Courbe de puissance	33	Équilibrage du rotor 59
Angle d'incidence	13	Couronne d'orientation	35	Équilibre écologique 60
Armoire de commande	14	D arrieus	36	Étude d'impact 61
Ascenseur	15	Déchet	38	Exploitant éolien 62
B alisateur lumineux	17	Démantèlement	39	F acteur 4 63
Boîte de vitesse	19	Développeur éolien	40	Fondation 64
Bord d'attaque		Disponibilité		Foudre 66
d'une pale	21	opérationnelle	42	Fournisseur
Bride	22	Dispositif « <i>pitch</i> »	43	d'énergie verte 67
Bruit	24	Distance aux habitations	44	France énergie éolienne 68
C alage des pales	25	É chauffement	45	Frein 69
Centrale hydraulique	26	Effet Venturi	46	G énératrice d'électricité 70
Certificat vert	27	Émission dans		GIEC 71
Classe de dommages		l'atmosphère	48	Girouette 72
de pales	28	Émissions télévisées		Grenelle de
		hertziennes	49	l'environnement 74

H élice	75	Permis de construire	108	Trainée d'une pale	133
I CPE : Installation classée		<i>Pitch</i>	109	Tourisme vert	134
pour la protection		Portance d'une aile	110	V ibrations	136
de l'environnement	76	Poste source	112	Vitesse	
Impact environnemental	77	Potentiel éolien	113	de synchronisme	137
Impact visuel	78	Production annuelle	114	Vitesse de vent	
L angue anglaise	80	Producteur d'énergie		de coupure	138
Lidar	81	électrique éolienne	115	Vitesse de vent	
Lubrification	83	Promoteur éolien	116	de démarrage	139
M aintenance	84	Protocole de Kyoto	117	V <i>aw</i>	140
Mât	85	Puissance instantanée	118	Z DE : Zone de	
Mât de mesure	87	Puissance maximale	119	développement	
Matériaux composites	89	Q ualité de l'électricité	120	éolien	141
Modélisation acoustique	90	R éseau européen EWIS	121		
Montage d'une éolienne	91	Risques liés			
Moulin à vent	93	à la maintenance	122		
Moulin chandelier	94	Rotor	123		
Moulin tour	95	S avonius	125		
Multiplicateur de		Schéma régional éolien	127		
vitesse	97	Servitude	128		
N acelle	99	<i>Stall</i> : décrochage			
P ale	101	aérodynamique	129		
Pale en drapeau	103	T arif d'achat	130		
Paquet climat-énergie	104	Télésurveillance	131		
Parc éolien	105	Théorie de Betz	132		
Parc éolien <i>off-shore</i>	106				

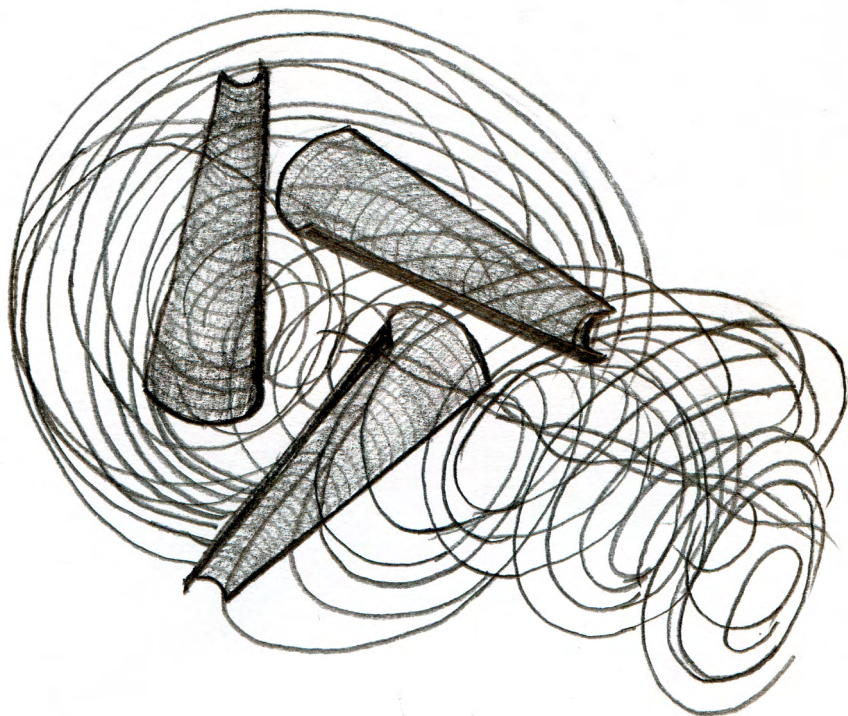
Ademe

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle conjointe des ministères en charge de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Cet établissement participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans le domaine de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, souhaitant s'engager ou progresser dans leur démarche environnementale, des capacités d'expertises et de conseils. Elle aide au financement des projets, depuis la recherche jusqu'à la mise en œuvre dans ses domaines d'intervention.

Aérodynamique

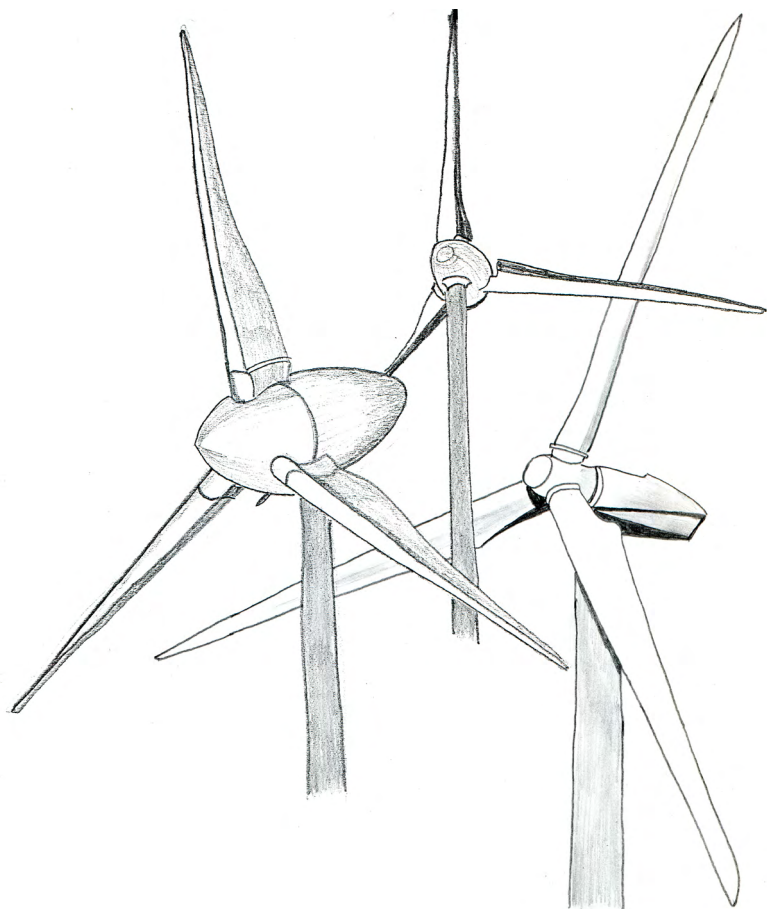
L'aérodynamique est l'étude des phénomènes induits par l'écoulement de l'air autour d'un solide. La forme des pales est étudiée pour que les éoliennes fournissent toujours plus d'électricité par vent faible et continuent de tourner pour des vents de plus en plus forts. Elles font l'objet de calculs aérodynamiques complexes afin de diminuer les turbulences et les phénomènes acoustiques créés par le choc du vent. Le dessin suivant montre la simulation du glissement du vent sur une éolienne à effet Venturi.



Aérogénérateur

Un aérogénérateur est une éolienne puissante installée sur un mât de grande hauteur qui fournit du courant électrique. Dans les champs éoliens, on trouve deux sortes d'aérogénérateurs :

- les machines dont l'hélice est directement reliée au rotor de la génératrice de courant sont courtes et de grand diamètre. Elles ont souvent une forme d'œuf ;
- les machines équipées d'une génératrice à grande vitesse de rotation, nécessitent d'inter-poser un multiplicateur de vitesse entre l'hélice et cette dernière. Elles ont plutôt la forme d'un cigare : grande longueur et faible section.



ALE : Agence locale de l'énergie et du climat

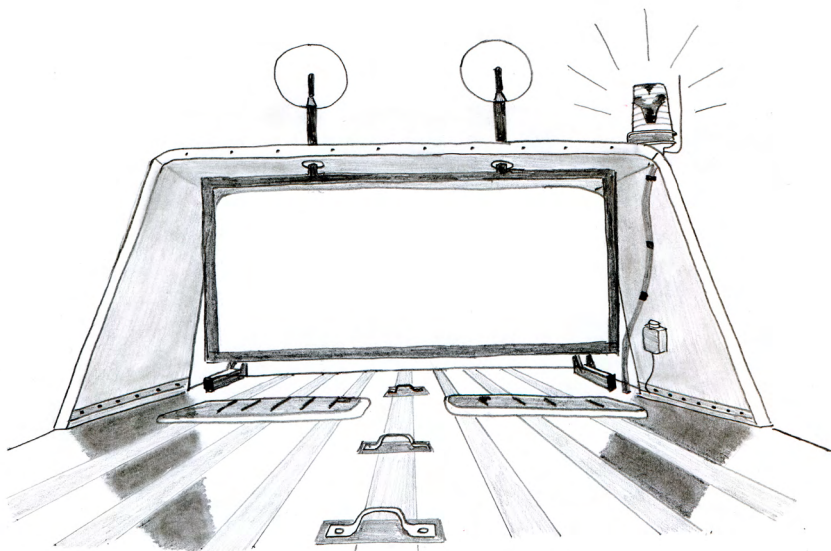
Une Agence locale de l'énergie est une association sans but lucratif qui rassemble tous les types d'acteurs autour de deux objectifs : les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables dans une perspective de développement durable. Dans les Ardennes, l'ALE 08 est très active sur l'éolien. Elle a participé à la création de la première formation de maintenance éolienne de France.

Alternateur

Un alternateur est une machine qui fournit de l'électricité à partir d'une puissance mécanique à l'entrée. Il est composé d'une partie fixe annulaire appelée stator et d'une partie centrale mobile appelé rotor. La rotation du rotor composé de bobinages engendre la production d'un courant électrique sur le stator. Il s'agit d'un moteur qui tourne à l'envers. Dans une centrale électrique, ce type d'alternateur tourne généralement à 1 500 tours/minute. Dans une éolienne, la vitesse du vent est variable, par conséquent, la vitesse du rotor de l'alternateur est variable. C'est pourquoi les alternateurs éoliens sont plus complexes que les alternateurs industriels. Pour la rendre compatible avec la qualité requise voulue par EDF, l'électricité produite est modifiée électroniquement avant d'être injectée sur le réseau électrique.

Anémomètre

Pour fonctionner le mieux possible, une éolienne doit réagir en fonction de la vitesse et de la direction du vent. L'anémomètre est l'équipement qui transmet l'information de vitesse de vent. Il a souvent la forme d'une petite turbine à axe horizontal. Sans cette information, une éolienne est inopérante. C'est pourquoi on l'équipe de deux anémomètres pour être certain qu'elle connaisse toujours la vitesse du vent.



Angle d'incidence

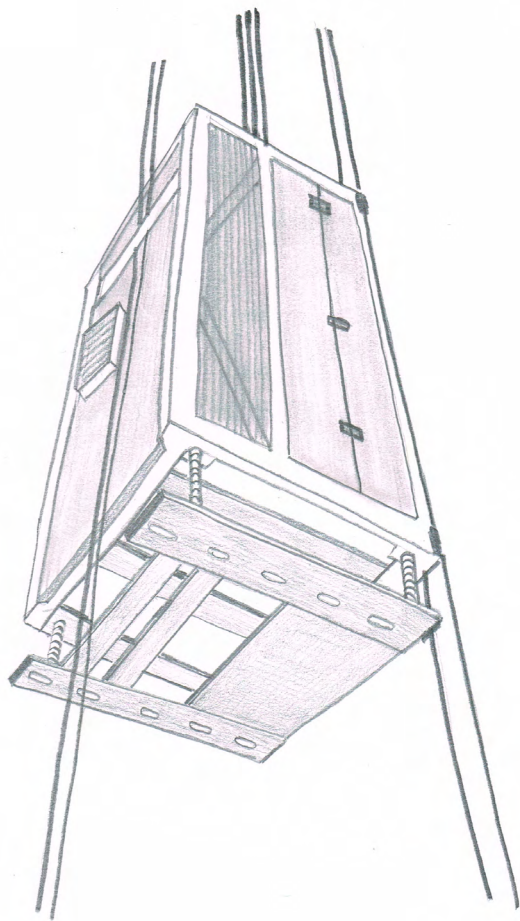
Une pale d'éolienne est mobile autour de son axe. Comme la voile d'un bateau, si le vent est faible il faut l'orienter pour qu'elle ait une grande prise au vent. Si le vent force, il faut réduire sa prise au vent. On appelle angle d'incidence cet angle d'orientation de la pale. Des moteurs asservis réduisent ou augmentent l'incidence des pales en fonction de l'information donnée par l'anémomètre.

Armoire de commande

Une armoire de commande située dans la nacelle contient des appareils électriques (alimentations, transformateurs, variateurs électroniques de vitesse...) ainsi que les automates programmables qui gèrent les fonctions de l'éolienne. Afficheurs numériques et LED permettent de suivre à tout instant l'état des équipements. Pour éviter aux agents de maintenance de monter au sommet du mât pour faire un *check-up* de l'éolienne, une seconde armoire est disposée au pied du mât. Une prise permet le branchement d'un ordinateur qui permettra d'agir sur les paramètres de la machines pour améliorer son fonctionnement en cas de modification de son environnement.

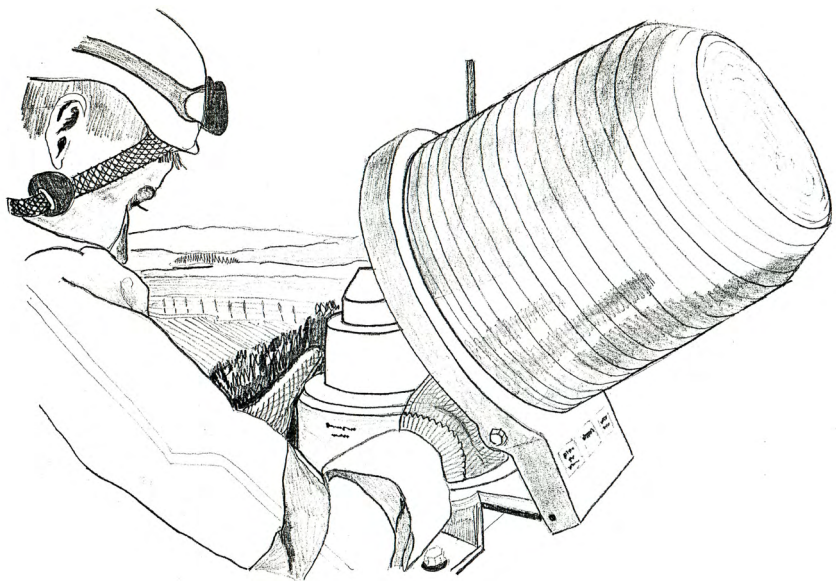
Ascenseur

Il n'est pas rare qu'une éolienne soit montée sur un mât d'une hauteur de 120 mètres. Apporter à l'échelle, en haut d'un tel mât, le matériel nécessaire à l'entretien de la machine, est long et fatigant. C'est pourquoi les éoliennes sont de plus en plus équipées d'un ascenseur. Revers de la médaille : cela fait un équipement en plus à surveiller.



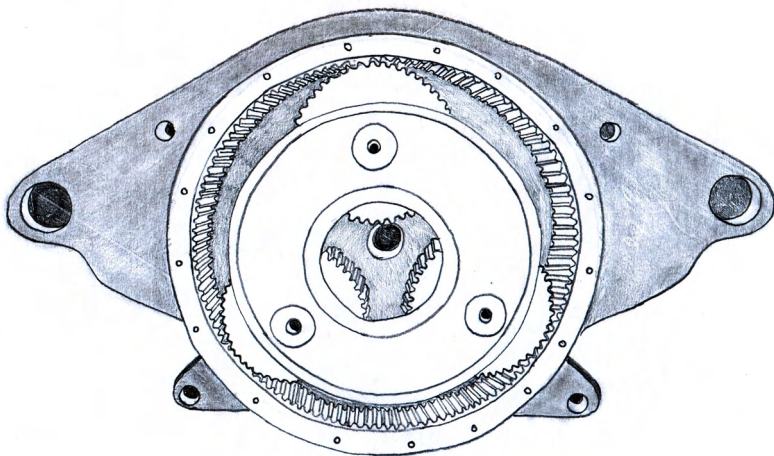
Balisage lumineux

Le code de l'aviation civile impose que les éoliennes doivent être repérées de loin par les avions. Les parcs éoliens doivent respecter une signalisation précise par des flashes lumineux positionnés sur toutes les nacelles. Les flashes lumineux d'un même parc doivent s'allumer en même temps avec une lumière blanche de 20 000 candelas le jour et une lumière rouge de 2 000 candelas la nuit. Le balisage est plus complexe pour les éoliennes dont la hauteur totale (pale verticale au dessus de la nacelle) dépasse 150 mètres. Comme il n'est pas aisé de remplacer une ampoule au sommet d'une éolienne, il vaut mieux installer des ampoules à LED : basse consommation et grande durée de vie.



Boîte de vitesse

De nombreux modèles d'aérogénérateurs sont équipés de génératrices de courant électrique qui s'inspirent des modèles industriels. Celles-ci tournent très vite. Il est nécessaire de multiplier la vitesse du rotor pour transmettre l'énergie mécanique à l'axe de rotation de la génératrice. Dans le jargon éolien on appelle boîte de vitesse (*gearbox* en anglais) le multiplicateur de vitesse qui s'interpose entre le rotor et l'axe de la génératrice. Bien sur, dans cette « boîte de vitesse », pas de sélecteur de vitesse ni de marche arrière !

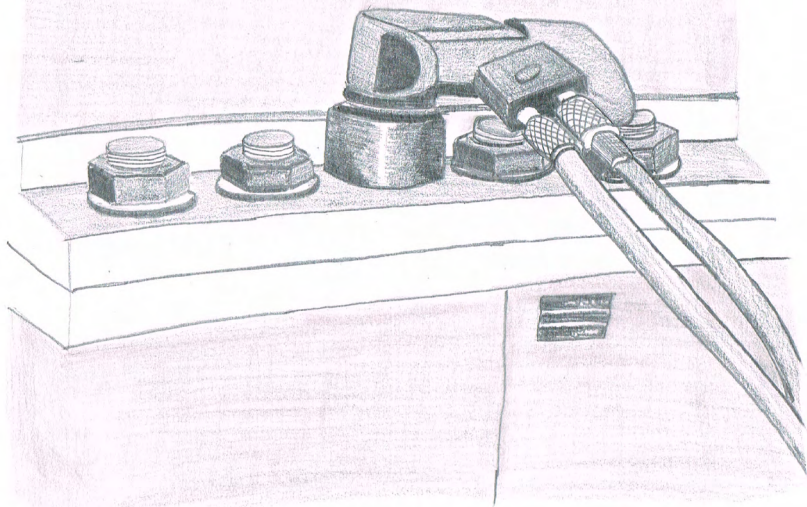


Bord d'attaque d'une pale

Le bord d'attaque est la section avant de la pale. C'est lui qui reçoit en premier le vent... et les projectiles. C'est pourquoi l'agent de maintenance monte régulièrement sur le toit des éoliennes pour vérifier si celui-ci n'est pas endommagé. Si c'est le cas, il note la gravité du dommage auquel on apportera une réparation appropriée.

Bride

Un mât éolien est composé de plusieurs tronçons qui se présentent sous la forme de tubes équipés de brides à chaque extrémité. Une bride est comme une collerette percée de trous sur son pourtour. Les brides sont reliées entre elles et serrées par des boulons. On ne voit pas les brides sur les mâts éoliens parce que la « collerette » est disposée à l'intérieur. Régulièrement le serrage des boulons est contrôlé. Les compagnies d'assurance vérifient l'état de leur serrage.



Bruit

C'est un des reproches que l'on fait aux éoliennes. Pourtant les aérogénérateurs modernes sont particulièrement silencieux. Si la machine est bien réglée, les bruits mécaniques ne sont pas perceptibles au pied de la tour. Quant au bruit du vent dans les pales, il suffit de se placer au pied d'une éolienne pour se rendre compte qu'il est très léger. Une éolienne ne doit pas gêner les habitants qui habitent à proximité : la norme à respecter est de 5 décibels le jour et 3 db la nuit. Parfois, pour certaines directions et intensités du vent, on peut entendre le vent siffler, tout comme des bruits mécaniques si la machine se dégrade, ce qui ne devrait pas se produire si elle est bien entretenue.

Calage des pales

Suivant la force du vent, l'incidence des pales est réglée par des moteurs asservis indépendants d'une pale à l'autre. Lorsqu'on monte les pales sur le moyeu l'une après l'autre, il faut s'assurer que les angles des pales sont cohérents. C'est ce qu'on appelle le calage des pales. Si la vitesse du vent devant chaque pale est la même, les angles d'incidence doivent être identiques.

Centrale hydraulique

Certains constructeurs d'aérogénérateurs optent pour des commandes hydrauliques : rotation de l'éolienne autour de son axe, réglage de l'incidence des pales, freinage de mouvement. Ces machines sont équipées de centrales hydrauliques qui alimentent ces moteurs en huile sous pression. Comme sur une voiture, il faut changer des filtres, vérifier le niveau d'huile, remplacer l'huile usagée régulièrement et veiller au niveau de température pour que l'huile ne fige pas par grand froid.

Certificat vert

Il existe deux moyens pour un producteur d'électricité à partir d'un champ éolien de gagner de l'argent : le tarif d'achat de son électricité et le certificat vert. La législation des pays favorise l'un ou l'autre de ces moyens. En France, EDF a l'obligation d'acheter cette électricité à un tarif avantageux. En Belgique, le tarif est moins intéressant mais pour chaque unité de production (mégawattheure) produite par l'éolien, un titre appelé certificat vert est délivré. Le producteur d'électricité éolienne peut le vendre à un fournisseur d'électricité qui a l'obligation, chaque année, d'en acheter une certaine quantité.

Classe de dommages de pales

Les pales sont contrôlées périodiquement. Il existe des équipes spécialisées dans leur réparation. Le technicien de maintenance en charge de la machine doit être capable d'évaluer la gravité du dommage pour faciliter l'intervention de ces spécialistes. Certains constructeurs ont établi quatre classes de gravité.

- Classe 4 : il reviendrait trop cher de réparer les dégâts légers. Ils sont seulement surveillés avec attention.
- Classe 3 : la pale peut être réparée sur place.
- Classe 2 : la détérioration nécessite le démontage de la pale en cause.
- Classe 1 : le dommage est tellement grave qu'il faut changer le jeu de pales entier.

Comité de liaison énergies renouvelables

Le Comité de liaison énergies renouvelables (CLER) est une association agréée de protection de l'environnement créée en 1985 qui dialogue régulièrement avec les pouvoirs publics. Son objet est la promotion des énergies renouvelables et de la maîtrise de l'énergie. Le CLER fédère près de 200 professionnels en solaire, éolien, bois énergie, biogaz, biocarburants, petite hydroélectricité, cogénération et géothermie. Il anime le réseau d'acteurs éoliens de terrain dans tous les domaines : conseils, maîtrise d'œuvre, informations (par des revues, vidéos et exposition), formations. Son credo : « s'unir pour promouvoir les énergies durables ».

Contrat de maintenance

Comme pour une voiture neuve, une éolienne est garantie par le constructeur à condition que ce soit lui qui en assure l'entretien pendant la durée de la garantie. Contrairement à une automobile, la durée de garantie est négociée entre le fabricant de l'éolienne et son client. Le fabricant garantit la production annuelle d'une certaine quantité d'électricité. S'il ne l'obtient pas, il verse de l'argent au client. S'il arrive à produire plus d'électricité que prévu, il touche une partie du bénéfice obtenu... d'où l'importance d'une maintenance efficace. À l'issue de cette période de garantie, le propriétaire du parc peut signer un contrat de maintenance avec une autre société ou rester avec le constructeur.

Contrôle du fonctionnement d'une éolienne

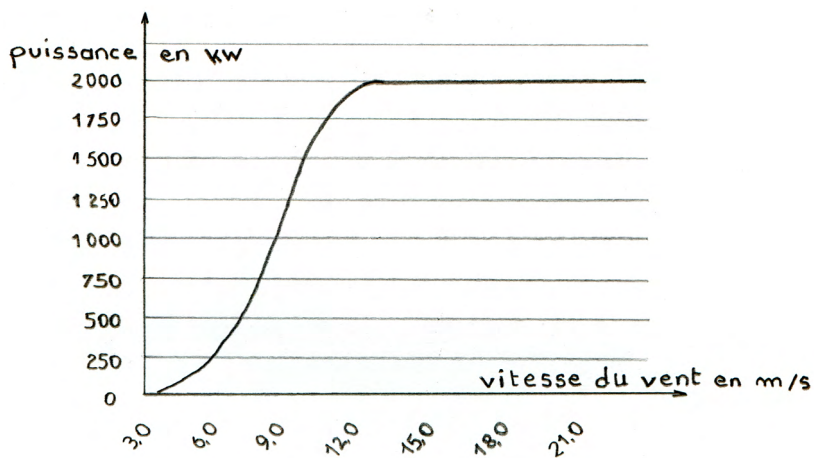
Une éolienne est une machine de haute technologie. De nombreux composants sont instrumentés c'est-à-dire équipés de capteurs qui transmettent des informations de vitesses, pressions, débits, températures... Ces informations sont accessibles aux techniciens de maintenance à partir d'une armoire de commande. Elles sont également envoyées à distance (toutes les cinq secondes par exemple) vers un centre de surveillance. Celui-ci est opérationnel 24 heures sur 24 et contrôle le fonctionnement de toutes les éoliennes dont l'entreprise de maintenance a la gestion sur un vaste territoire qui peut s'étendre à tout un continent.

Couleur

La couleur des éoliennes est définie en termes de quantités calorimétriques limitées au domaine blanc et de facteur de luminance supérieur ou égal à 0,4. La couleur blanche doit être appliquée uniformément sur le fût, la nacelle et les pales de l'éolienne.

Courbe de puissance

La puissance délivré par le vent sur l'hélice est proportionnelle à la puissance trois de la vitesse du vent. La courbe de puissance indique la quantité d'électricité disponible sur une plage de vent entre 1 m/s et 35 m/s. Selon ses principes de construction, une éolienne tire le meilleur profit du vent sur certaines plages de vitesse. Quelques machines se mettent en mouvement par vent très faible ; d'autres montent rapidement en puissance et produisent plus de courant électrique que les concurrentes sur la plage courante de vitesse de vent ; certaines continuent de fonctionner par grand vent quand ses concurrentes sont obligées de s'arrêter. Pour choisir l'éolienne la mieux adaptée aux caractéristiques venteuses du site où elle doit être implantée, l'étude de la courbe de puissance est primordiale. Elle sera comparée au profil venteux du site d'implantation.

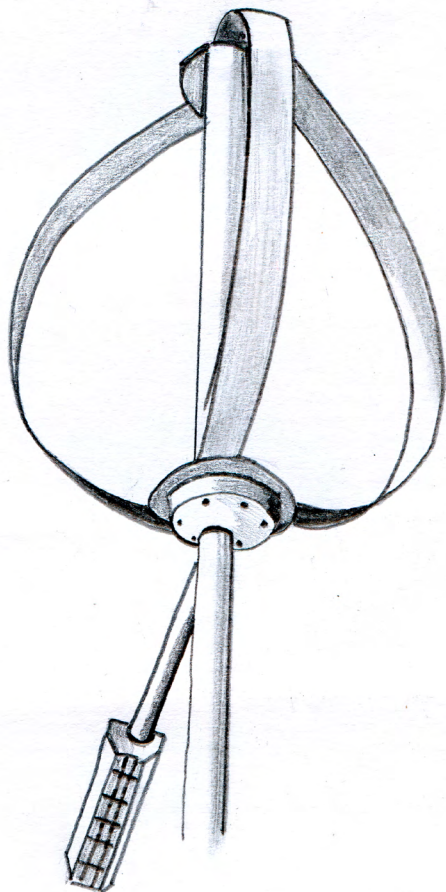


Couronne d'orientation

Pour tourner la nacelle éolienne face au vent, une bague d'un gros roulement à billes est solidaire de son châssis. L'autre bague, équipée d'une grande roue dentée, est fixée au sommet du mât. En engrenant leur pignon arbré sur cette roue dentée, des moteurs installés dans la nacelle orientent face au vent ce roulement particulier appelé couronne d'orientation. On trouve également des couronnes d'orientation à la base des pales pour les rotors équipés d'un système *pitch*.

Darrieus

L'ingénieur français Georges Darrieus, né en 1888, a été membre de l'Académie des sciences. Il est surtout connu pour son éolienne à axe vertical qui ressemble à un gros batteur à œuf. Cette disposition évite d'orienter la machine dans la direction du vent. Elle a deux avantages : un fonctionnement particulièrement silencieux et une puissance 50 % supérieure à celle d'une éolienne à axe horizontal de même taille. Les tentatives de construction d'éoliennes Darrieus puissantes n'ont pas été fructueuses, les contraintes mécaniques étant trop importantes. Ce principe est encore utilisé pour des petites éoliennes ou des lampadaires urbains autonomes alimentés par le vent.



Déchet

Au moins 95 % du poids des composants d'une éolienne est recyclable. En pourcentage de volume, c'est moindre puisque ce sont les pales qui posent problème. Actuellement, broyées et considérées comme déchets industriels non dangereux, elles servent comme remblais routiers. D'autres traitements des pales en fin de vie sont à l'étude comme la pyrolyse par micro-ondes envisagée par un laboratoire de recherche suédois.

Démantèlement

Le démantèlement d'une éolienne laisse un terrain non pollué sans déchet. Une éolienne peut être démontée en trois jours. Seule subsiste une partie du socle en béton massif dont environ les deux premiers mètres ont été retirés pour être recouverts de terre. En France la législation impose que le propriétaire du champ éolien mette de côté, dès le début de son activité, une certaine somme d'argent qui servira à payer le démantèlement lorsqu'il cessera son exploitation.

Développeur éolien

Dans la préhistoire, lorsque les hommes se sont sédentarisés, ils ont cherché les meilleurs endroits pour cultiver la terre. Ils ont sélectionné les emplacements qui réunissaient de nombreux avantages : une bonne qualité de la terre, une bonne exposition au soleil, un point d'eau proche pour pouvoir arroser, un accès facile, la proximité d'un lieu permettant de se mettre à l'abri des prédateurs... Avec l'éolien, il faut repartir à zéro, refaire la même démarche avec d'autres critères pour trouver les lieux qui ont le meilleur potentiel. Ce sont les développeurs éoliens (ou promoteurs éoliens) qui recherchent ces emplacements et préparent la création de parcs éoliens avec une approche commerciale et administrative. Le travail du développeur est terminé lorsqu'il dépose le permis de construire auprès des pouvoirs publics. Si le permis de construire est accordé, il le vend à une autre entreprise qui installera les éoliennes. S'il s'agit d'un service développement d'une entreprise intégrée (développement de sites éoliens, service achat des machines, service calcul et réalisation des fondations, installation des machines, maintenance) c'est une autre branche de l'entreprise qui s'en charge. C'est un autre métier !



Disponibilité opérationnelle

La disponibilité d'un équipement, exprimée en pourcentage, est un indicateur de maintenance obtenu en divisant la durée pendant laquelle l'équipement est opérationnel par la durée totale durant laquelle on aurait souhaité qu'il le soit. L'arrêt d'une éolienne pendant sa révision périodique, lorsqu'elle tombe en panne ou est en attente d'une pièce détachée, réduit son taux de disponibilité. Une éolienne doit pouvoir fournir de l'électricité 24 heures sur 24 tous les jours de l'année. Un taux de disponibilité de 98 % signifie qu'elle n'a pas pu fonctionner pendant l'équivalent de sept jours sur l'année.

Dispositif « *pitch* »

Les pales sont orientées pour prendre plus ou moins le vent par un dispositif appelé *pitch*. À l'origine toutes les pales présentaient, à un instant donné, le même angle d'incidence par une commande centralisée. Maintenant chaque pale est indépendante et le *pitch* est sophistiqué. Pour les très grandes éoliennes dont les pales font jusqu'à 50 mètres de longueur, l'angle d'incidence de la pale positionnée au-dessus de la nacelle est différent de celui des autres pales situées au-dessous.

Distance aux habitations

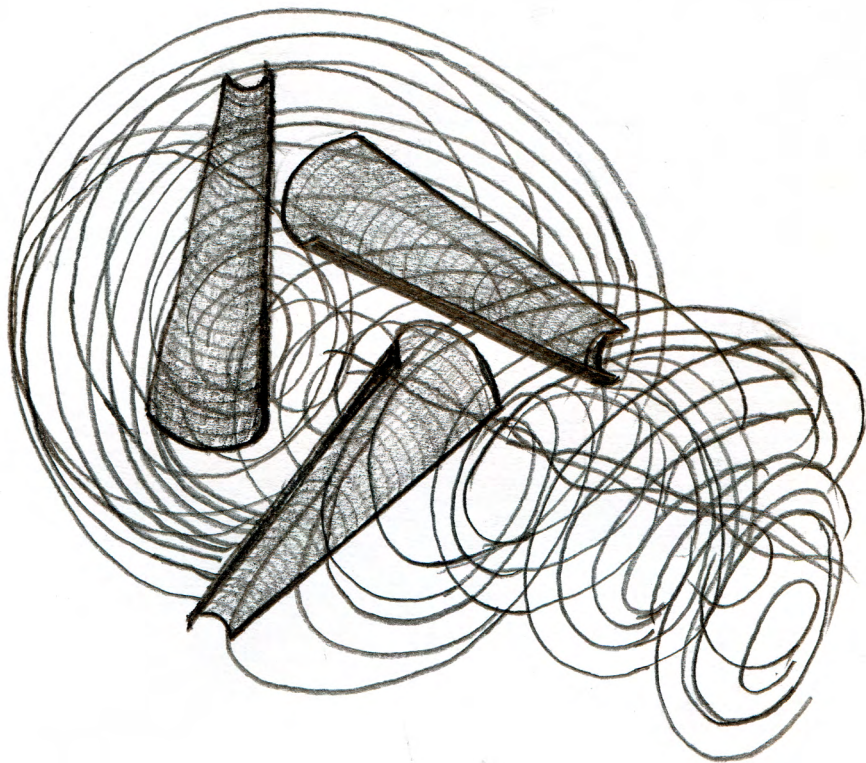
Le Grenelle de l'environnement a introduit de nouvelles contraintes pour l'établissement des parcs éoliens. En particulier, les machines doivent être distantes d'au moins 500 mètres des zones cadastrales destinées à l'habitation (qu'elles soient construites ou pas). En réalité, les machines sont souvent plus éloignées que cela des habitations, l'impact sonore d'une éolienne ne devant pas dépasser un certain nombre de décibels. Les projets éoliens sont soumis à enquête publique. La population a accès aux pièces du projet pendant un mois et peut donner son avis. Ces développeurs font tout ce qu'ils peuvent pour que les machines n'aient pas d'impact sonore appréciable sur les riverains afin que le projet soit accepté par la population.

Échauffement

Une chaleur excessive peut être une cause de dysfonctionnement d'une éolienne. L'échauffement peut provenir de la génératrice. Son principe de fonctionnement implique une élévation de température. Il est nécessaire de refroidir la génératrice avec des ventilateurs d'extraction des calories. Les multiplicateurs de vitesse sont une autre source d'échauffement. Leurs engrenages baignent dans l'huile. Leur mouvement provoque l'élévation de la température de l'huile si la quantité d'huile ou sa circulation sont insuffisantes. Enfin, des freins à disque constituent une source épisodique d'échauffement. Des capteurs de température sont disposés à différents endroits de la nacelle pour avertir le centre de surveillance si la chaleur dépasse un certain seuil.

Effet Venturi

En aérodynamique, lorsque des filets d'air entrent dans un entonnoir, la vitesse du vent augmente et l'air appuie de plus en plus fortement sur les bords de l'entonnoir. Des éoliennes de petite capacité utilisent ce principe Venturi avec des pales en forme de portions de cônes. Ce sont des machines très robustes qui continuent de tourner même par vent turbulent.



Émission dans l'atmosphère

L'éolien n'émet aucune émission polluante. C'est une technologie reconnue pour lutter contre les gaz à effet de serre comme le CO_2 . Son développement réduit les émissions polluantes en limitant l'appel aux centrales à charbon ou au gaz, deux combustibles responsables d'émission de gaz à effet de serre.

Émissions télévisées hertziennes

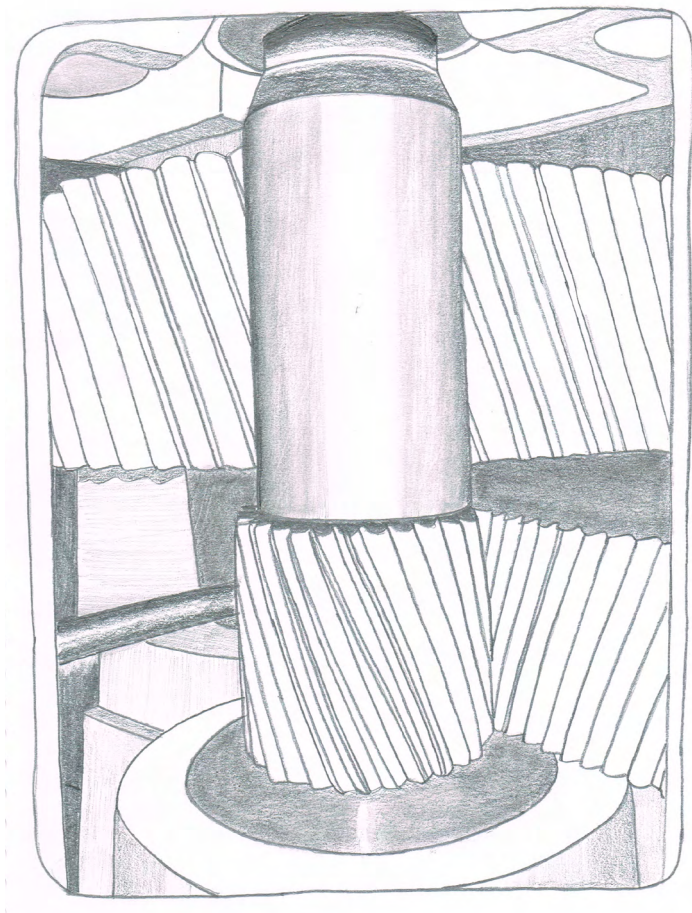
Il est exact que les grandes éoliennes peuvent perturber la réception des émissions télé hertziennes. Mais pas de panique ! Le propriétaire du parc éolien ne vous laissera pas tomber et prendra à sa charge la réception de vos émissions TV en vous offrant une parabole par exemple.

Énergie verte ou énergie renouvelable

Comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne fait partie des énergies renouvelables parce qu'elle n'est pas obtenue à partir de l'extraction de pétrole, gaz, charbon, uranium et autres matériaux issus du sous-sol. On parle d'énergie verte parce que cette couleur est associée à la nature et à l'écologie.

Engrenage

Un engrenage est un ensemble de deux roues dentées qui engrènent ensemble. Généralement, une roue est entraînée par un moteur et l'autre roue met en rotation le composant qu'on veut faire tourner : la nacelle qui se positionne face au vent, la pale qui prend le bon angle d'incidence, le rotor de la génératrice. Un engrenage nécessite des réglages précis. Plusieurs fois par an, les dents sont vérifiées visuellement. Une trappe située sur le dessus du multiplicateur permet de vérifier que les dents ne sont pas abimées.



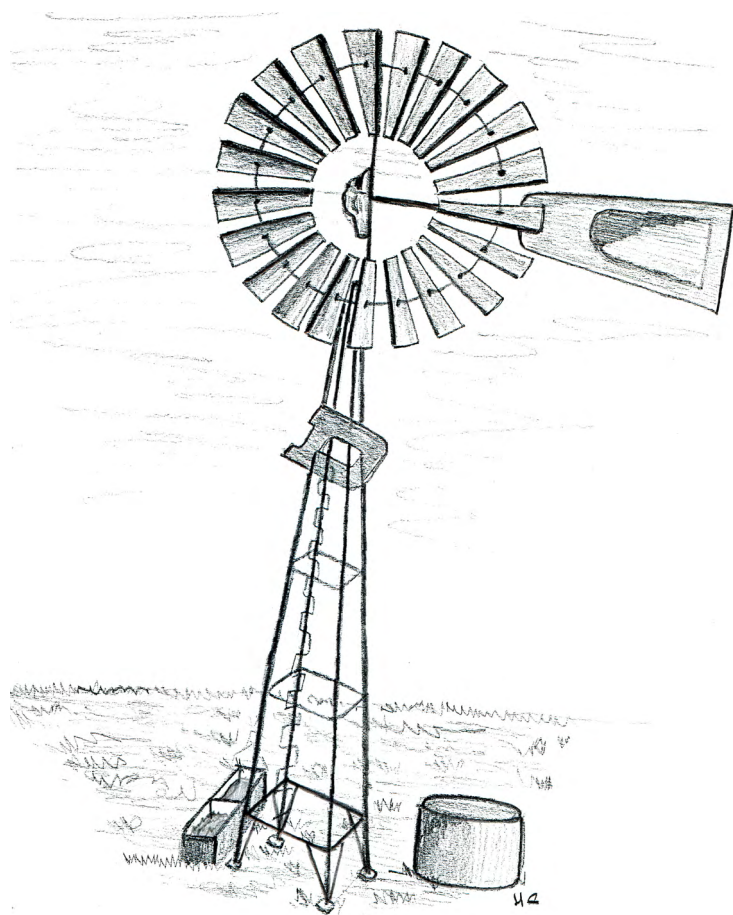
Éole

Dans la mythologie grecque, Éole est maître et régisseur des vents. Il calme l'un, déclenche l'autre en force comme en direction. Clément Ader en a donné le nom au premier appareil plus lourd que l'air à quitter le sol. Mû par une machine à vapeur, Éole n'a jamais réussi à se maintenir en vol.



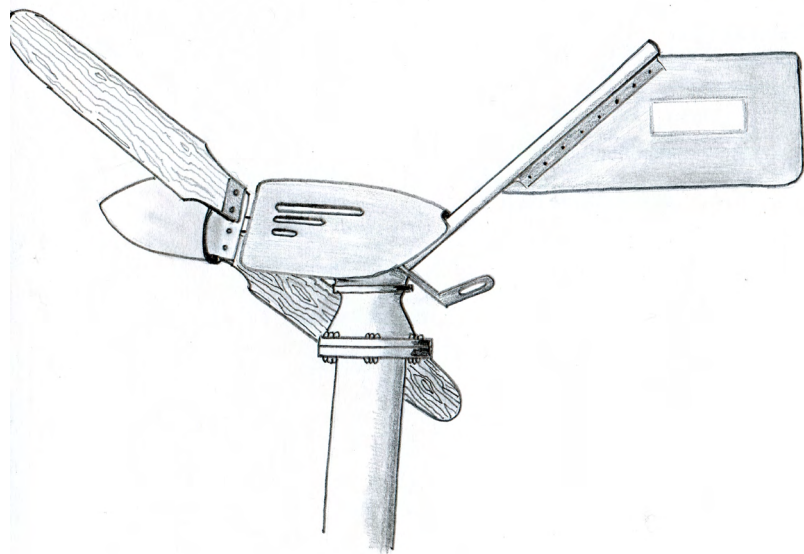
Éolienne à pompage

De nombreuses éoliennes rustiques de ce type avec leurs très nombreuses pales sont visibles sur les pâturages dans toutes les régions de France... et sur le toit de certains restaurants dont l'aspect extérieur s'inspire de l'ouest américain. L'énergie du vent est utilisée pour remonter de l'eau dans les abreuvoirs ou dans des réservoirs sans passer par du courant électrique. Il en existe encore un fabricant dans les Ardennes.



Éolienne domestique

Si les aérogénérateurs sont des éoliennes puissantes destinées à injecter du courant dans le réseau électrique, il existe de petites éoliennes dont la puissance ne peut alimenter que quelques bâtiments hors chauffage. Le plus souvent, ces éoliennes domestiques servent à maintenir chargées des batteries comme sur les voiliers sur lesquels les équipements électriques ne sont alimentés que par ces batteries.



Équilibrage du rotor

Lorsqu'une roue avant de voiture est déséquilibrée, le chauffeur ressent des vibrations dans le volant. Ces vibrations, importantes à certaines vitesses, endommagent la direction. Il en est de même pour les pales d'une éolienne. Les trois pales sont faites pour être assemblées sur le même rotor pour former une hélice. Si un trou dans l'une d'elles, nécessite une opération de rebouchage, il faut veiller à remettre la même quantité de matière qu'auparavant sinon les vibrations réduisent la durée de vie de la machine.

Équilibre écologique

Un parc éolien ne doit pas modifier l'équilibre écologique du territoire sur lequel il est installé. Si un mât éolien ou un chemin d'accès supprime une mare habitée par une espèce animale ou végétale protégée, il devra mettre en place un autre habitat pour ces espèces pour ne pas perturber la proportion des animaux qui peuplent ce territoire.

Étude d'impact

Pour monter un dossier de création d'un parc éolien, en plus des documents administratifs, le développeur doit faire appel à un cabinet d'écologie pour fournir une étude d'impact. Celle-ci garantira qu'aucune espèce végétale ou animale protégée ne souffrira de l'installation des éoliennes.

Exploitant éolien

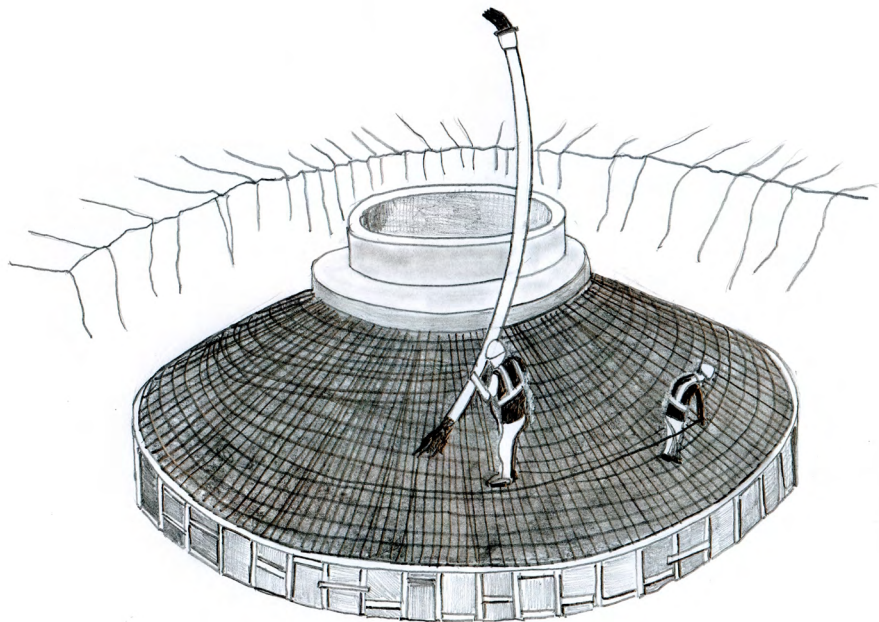
L'exploitant du parc éolien est un producteur d'électricité. Il s'assure du bon fonctionnement des machines et récolte le bénéfice de la production. Cette production se mesure en quantité de courant distribuée pendant l'année dans le réseau électrique.

Facteur 4

Cette expression désigne un engagement écologique qui vise la division par quatre des émissions des gaz à effet de serre (GES) d'un pays ou d'un continent à l'horizon 2050. L'excès de production de ces GES est facteur de réchauffement climatique. En France, cet engagement a été pris en 2003 et validé par le Grenelle de l'environnement en 2007. Les réductions de ces émissions dans le secteur des transports et du bâtiment en sont les principaux objectifs. La montée en puissance de l'énergie éolienne, avec la diminution de l'utilisation des énergies fossiles qui en découle, est un élément participant à la réalisation de ces objectifs.

Fondation

En faisant tourner les pales, le vent exerce un effort sur le mât. Celui-ci doit être bien fixé pour éviter qu'il ne se couche en cas de tempête. C'est un bureau d'études spécialisé qui calcule le massif en béton ferrailé en fonction de la nature du sol. Parfois, le massif en béton s'appuie sur de la roche peu profonde. Parfois, des pieux vont chercher en profondeur une couche suffisamment dure. Du massif, on ne voit dépasser que l'anneau formé par les tirants métalliques qui serviront à fixer le mât et les gâines qui seront garnies des câbles électriques. Il faudra attendre au moins un mois que le béton sèche avant d'installer le premier tronçon du mât. En fin d'exploitation les premiers mètres de béton seront rognés et le restant du massif recouvert de terre. Il ne restera aucune trace visible de la présence passée d'une éolienne.



Foudre

La foudre est la première cause de dommage des pales. Une pale étant fabriquée en matériau composite à base de fibres et de résine plastique, elle ne fait pas office de cage de Faraday. La foudre crée de gros trous à sa surface. Pour les éviter, les pales sont équipées de câbles anti foudre qui canalisent l'énergie électrique apportée par l'éclair.

Fournisseur d'énergie verte

Le marché de l'électricité étant libre, vous avez le choix de votre fournisseur. Les fournisseurs d'électricité achètent le courant à des producteurs pour satisfaire leurs clients. Un fournisseur d'électricité verte comme Enercoop ne propose que de l'électricité ne faisant pas appel à du combustible fossile.

France énergie éolienne

France énergie éolienne (FEE) est une association qui œuvre à la promotion de l'énergie éolienne en France. Elle rassemble près de 250 professionnels de la filière : développeurs, exploitants, industriels, équipementiers, bureaux d'études et organismes de formation. L'association défend l'intérêt de ses membres et fait valoir les bénéfices de l'énergie éolienne auprès de l'opinion publique et des médias. Elle est organisée en groupes territoriaux. Le groupe régional Est regroupe la Champagne-Ardenne, la Lorraine et l'Alsace.

Frein

Des freins à disque bloquent le rotor de l'éolienne par grand vent et d'autres bloquent la nacelle face au vent. Même si les disques de freins ne sont pas portés au rouge comme sur une formule 1, le frottement des garnitures de frein sur les disques augmente rapidement leur température. Les fabricants de freins veillent à ce que leur fonctionnement ne provoque pas d'étincelles et équipent parfois les disques de capteurs de température pour la surveiller en permanence.

Génératrice d'électricité

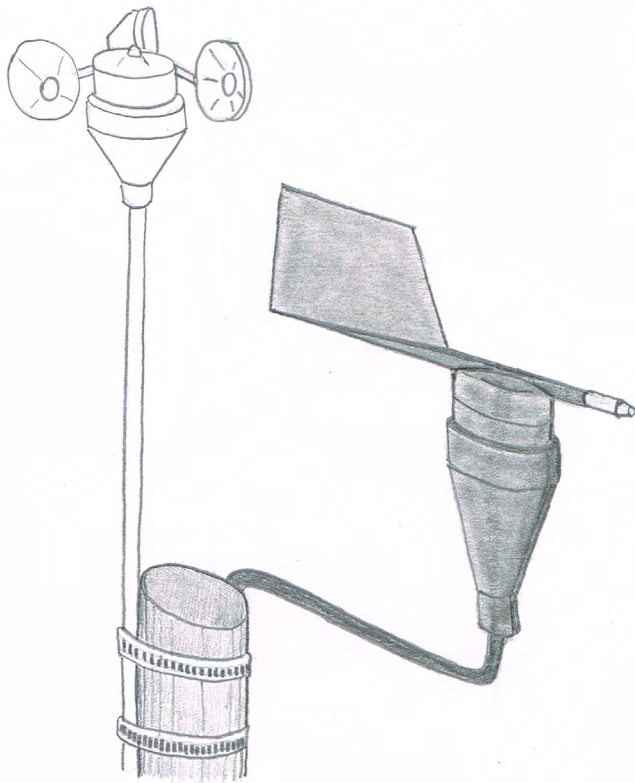
C'est une autre dénomination d'un alternateur. La puissance électrique fournie dépend de la puissance mécanique apportée au rotor. Se fier aux indications de sa plaque d'identification n'est pas suffisant. Pour estimer la puissance électrique réelle, il faut connaître la puissance mécanique fournie par le vent sur l'hélice.

GIEC

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement), il procède régulièrement à une évolution des connaissances relatives au changement climatique. Il vient d'élaborer un rapport spécial *Les sources d'énergies renouvelables et les mesures d'atténuation du changement climatique*. Ce rapport met en évidence la possibilité d'assurer 80 % de l'approvisionnement mondial en énergie par des ressources d'énergies renouvelables d'ici 2050 si l'effort est soutenu par des politiques publiques. Ce scénario permettrait de contenir l'augmentation de la température moyenne dans le monde à 2°C au XIX^e siècle. Avec un potentiel technique (en équivalent joule/an) qui le place juste derrière la géothermie et le solaire, l'éolien est bien placé pour participer à la réalisation de ce scénario si les politiques publiques y sont favorables.

Girouette

Elle indique la direction du vent. C'est par cette information que l'éolienne pivote pour se positionner face au vent. Mais attention ! Si le vent change constamment de direction, il ne faut pas que l'éolienne joue au yoyo. Un programme informatique la force à rester immobile quelques minutes et ne la fait bouger que si le vent se stabilise un minimum de temps.



Grenelle de l'environnement

La loi « portant engagement national pour l'environnement » dite Grenelle II comporte des aspects concernant l'énergie. L'énergie éolienne est concernée. D'abord, cette loi met en place les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie. Ces schémas sont élaborés conjointement par les préfets et les présidents de région et précisent, entre autres, les lieux où pourront être implantées des éoliennes de production d'électricité. D'autre part, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité doit élaborer un schéma de raccordement des énergies renouvelables. Ce schéma ne concerne que le réseau de transport et ses postes de transformation (et vise très majoritairement l'éolien). Enfin, les éoliennes sont soumises au classement ICPE.

Il est à noter que le Grenelle II confirme l'engagement d'obtenir en France une puissance en énergie éolienne de 25 000 MW en 2020. La loi du Grenelle comporte une centaine d'articles. Elle a profondément modifié la filière éolienne.

Hélice

Contrairement aux hélices des bateaux qui sont monobloc et agissent dans un milieu liquide, les hélices éoliennes sont profilées pour prendre le vent et formées par des pales montées sur un moyeu installé au bout de l'arbre de l'éolienne. On appelle aussi cet ensemble rotor.

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

Un parc éolien est considéré comme une installation industrielle d'une certaine importance. Dans un souci de protection de l'environnement, préalablement à sa mise en service, il doit faire l'objet d'une autorisation préfectorale. L'instruction et l'enquête se font sur la base du dossier ICPE dans lequel la personne (physique ou morale) qui se propose de le mettre en service, décrit les éventuels dangers ou inconvénients présentés en cas d'accident ainsi que les mesures prises pour en réduire la probabilité et les dangers. Cette nouvelle contrainte administrative a beaucoup fait parler d'elle, l'éolien étant destiné à réduire les gaz à effet de serre et l'utilisation des énergies fossiles. Mais comme toute installation industrielle, une turbine éolienne n'est pas exempte de risque.

Impact environnemental

Le dossier de demande d'exploitation d'un parc éolien comprend nécessairement une étude d'impact environnemental. Cette étude est un élément essentiel du dossier. Par exemple, si la voie d'accès à une éolienne passe sur une mare habitée par des crapauds sonneurs à ventre jaune, il ne suffira pas au promoteur éolien de la combler. Il lui faudra, s'il ne peut pas déplacer la route, construire un autre habitat pour cette espèce protégée. L'étude d'impact présente successivement :

- une analyse de l'état initial du site et de son environnement ;
- une analyse des effets directs ou indirects, temporaires ou permanents sur l'environnement et en particulier les sites et les paysages, la faune et la flore, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, émissions lumineuses), sur l'agriculture, sur la protection des biens matériels et du patrimoine culturel, la santé, l'hygiène, la salubrité ou la sécurité publique ;
- les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue environnemental, le projet présenté est retenu ;
- les mesures envisagées pour supprimer, limiter et si possible compenser les inconvénients de l'installation ;
- les conditions de remise en état du site après exploitation.

Impact visuel

Lorsqu'un projet de parc éolien voit le jour, une partie de la population prend peur à l'idée que les éoliennes soient visibles de tous côtés et à plusieurs kilomètres. C'est plus ou moins vrai selon que le parc est installé sur un plateau dénudé ou dans un bocage vallonné.

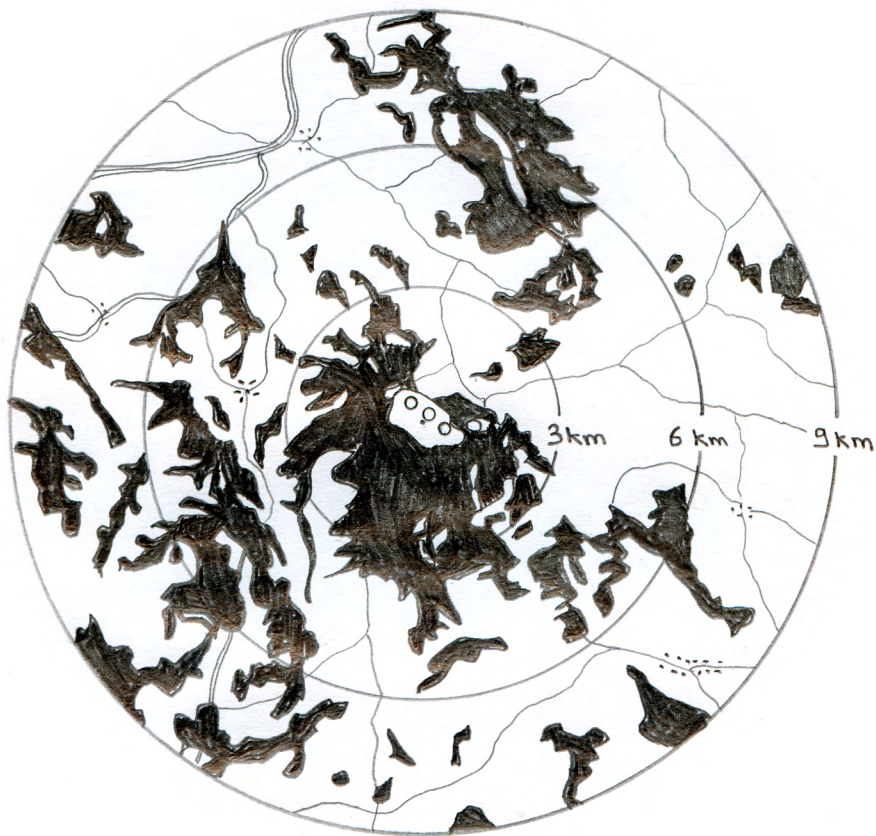
Pour rendre compte de la zone d'influence du parc, le promoteur éolien intègre souvent dans son projet une carte de visibilité en couleur. Sur une carte topographique, des cercles centrés sur le parc délimitent les zones à 3, 6, 9 et 12 km. Chaque millimètre carré de territoire est teinté d'une certaine couleur selon le nombre d'éolienne qu'on y voit.

Exemple pour un parc éolien de trois machines :

- rouge si on y voit les trois éoliennes ;
- brun si on voit deux machines ;
- jaune pour une seule ;
- bleu si le parc n'est pas visible.

Si le bleu est dominant sur la carte, le parc présente peu de pollution visuelle. Cette carte qui indique villages, routes, forêts et rivières, est un indicateur de visibilité du parc très parlant.

Sur la carte simplifiée ci-après, les taches sombres correspondent aux endroits du territoire où les trois éoliennes sont visibles.

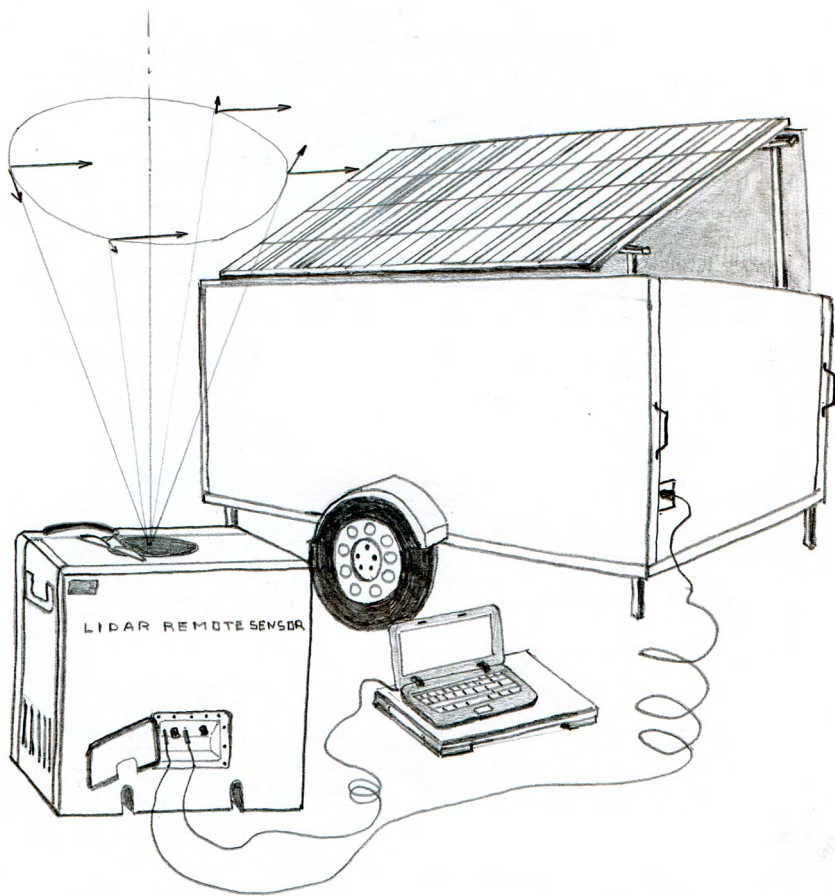


Langue anglaise

L'anglais est la langue officielle du milieu éolien. En effet, les constructeurs d'éoliennes assurent la maintenance des machines pendant la période de garantie. Comme ils ne peuvent pas toujours envoyer tous les employés nécessaires à l'autre bout du monde, ils recrutent sur place du personnel encadré par quelques uns de leurs agents de maintenance confirmés. Ce personnel local reçoit une formation de base d'une quinzaine de jours en langue anglaise. Les équipes ainsi formées échangent en langue anglaise. D'autre part, les nouveaux personnels de maintenance embauchés par les plus gros fabricants, reçoivent, parmi leur équipement de travail, un ordinateur qui dispose des fiches de maintenance des différents modèles d'éolienne en langue anglaise. Sans forcément parler un anglais très pur, les candidats à un poste de maintenance éolienne doivent comprendre et se faire comprendre dans cette langue s'ils veulent faire carrière dans cette profession.

Lidar

On peut mesurer la vitesse du vent à partir de l'émission d'un faisceau laser et de la mesure du signal de rétrodiffusion. Le réfléchissement du signal dans les différentes particules de l'air permet de déterminer le profil du vent jusqu'à haute altitude. Cet appareil météorologique, le lidar, est facilement mis en œuvre sur un terrain plat et sans obstacle de manière autonome via une remorque équipée de générateurs et panneaux solaires.



Lubrification

Dans les multiplicateurs éoliens, le frottement des dents d'engrenage les unes contre les autres risque, si on n'y prend pas garde, de les user précocement et d'échauffer exagérément leur matériau. Pour contenir la température et limiter l'usure, les engrenages sont lubrifiés par barbotage ou pulvérisation d'huile. Le système de lubrification nécessite réservoir, filtre, pompe, buses, canalisations... composants qui sont sujets à une surveillance attentive des agents de maintenance.

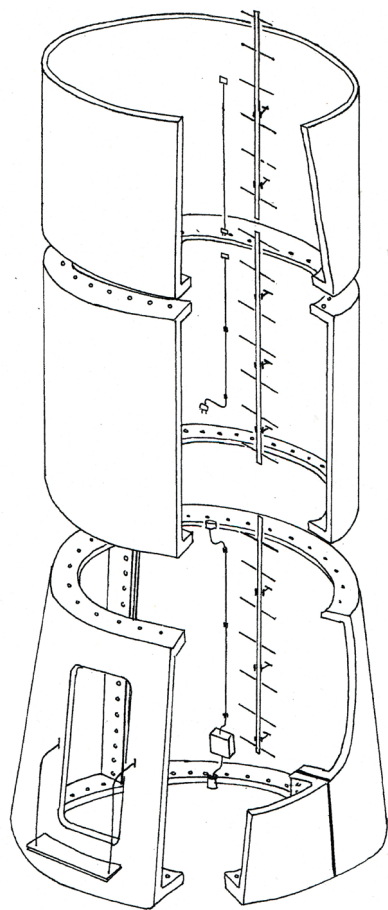
Maintenance

Comme tout mécanisme susceptible de fonctionner un long moment sans interruption, une éolienne possède des pièces d'usure à remplacer régulièrement. Pour garantir sa disponibilité opérationnelle, le gestionnaire du parc doit faire appel au service maintenance qui mettra en place les stratégies et tactiques nécessaires au maintien en état de fonctionnement optimal de la machine : remplacement de pièces d'usure, réparation optimisée en cas de défaillance d'un élément.

Un parc éolien tire son profit de la revente de l'électricité à un fournisseur d'énergie. Le potentiel éolien du parc étant estimé et le tarif de la revente imposé, le chiffre d'affaire annuel du parc éolien est très facile à établir. Côté dépenses, en plus des impôts et autres taxes, le gestionnaire du parc doit donner de l'argent aux agriculteurs dont les terres supportent les éoliennes, à ceux qui pâtissent de la servitude du passage des câbles à haute tension sous leur terre. Il doit rémunérer les actionnaires, rembourser les prêts d'achat des machines et supporter le coût de la maintenance. À part la maintenance, les autres charges sont fixes. Le coût de la maintenance aura un impact fort sur la marge bénéficiaire du parc. L'objectif est de réaliser un entretien du parc qui optimise, à moindre coût, sa disponibilité opérationnelle d'où la nécessité d'un service maintenance bien structuré et efficace.

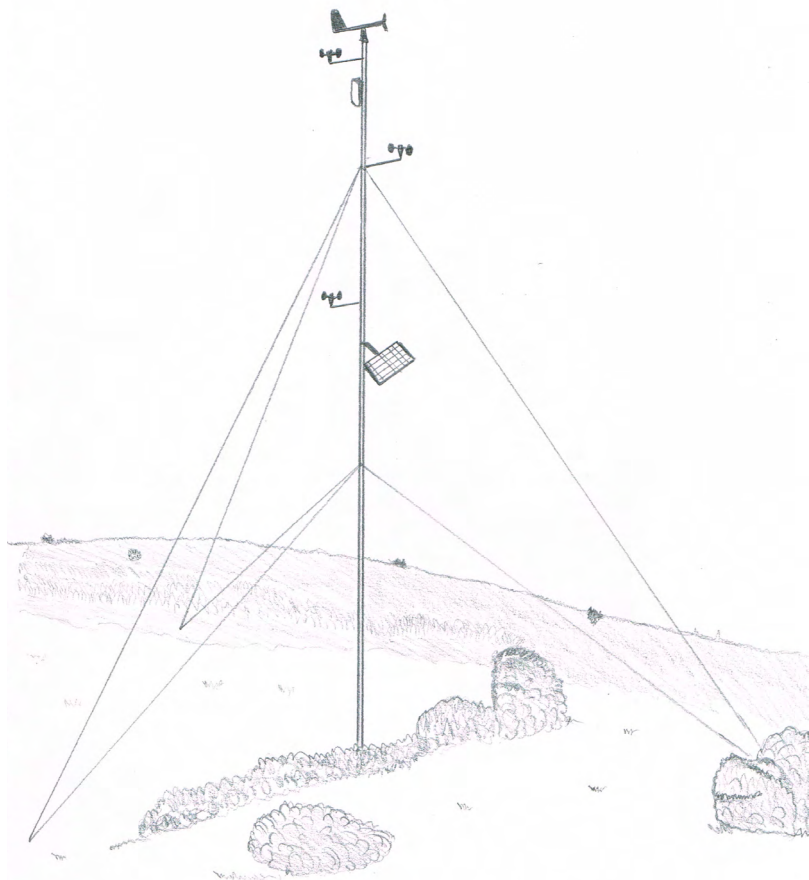
Mât

Le mât qui supporte la nacelle a plusieurs fonctions : mettre les pales à bonne hauteur de prise au vent, recevoir les câbles électriques qui transmettent le courant fourni au réseau, amortir les vibrations de fonctionnement et permettre l'accès de la nacelle aux équipes de maintenance. Depuis que les treillis métalliques sont remplacés par des tours tubulaires fermées, la mortalité des oiseaux a fortement chuté. Les nacelles étant installées de plus en plus haut, le mât est constitué de plusieurs tronçons légèrement coniques en acier dont le diamètre et la longueur sont limités par l'accès au réseau routier. Transporter sur des camions des tronçons de mât jusqu'au lieu final d'assemblage, en pleine campagne, nécessite une organisation complexe. On trouve de plus en plus un premier tronçon sous forme de portions de cylindres en béton. Le premier anneau est assemblé sur le site et posé sur les fondations. Le béton a l'avantage de mieux amortir les bruits et les vibrations que l'acier. Il faut serrer un grand nombre de boulons pour assembler un mât. Le serrage de ces boulons est vérifié deux fois par an.



Mât de mesure

Pour établir le diagnostic venteux d'un site qui semble propice à l'énergie éolienne, on y installe un mât haubané (les plus courants ont 80 mètres de hauteur) sur lequel sont installés, à intervalles réguliers, des anémomètres et, à son sommet, un balisage lumineux de couleur rouge fixe. Son installation nécessite le dépôt d'un dossier de déclaration au maire de la commune, l'autorisation du ministre chargé de l'aviation civile et du ministre chargé des armées. Elle doit faire l'objet d'une information auprès des usagers aéronautiques. C'est la méthode la plus fiable pour connaître vitesse et direction du vent à différentes hauteurs. Enregistrées, ces vitesses permettent de tracer un graphique qui montre à chaque altitude l'évolution du vent sur l'année et d'établir la courbe de rugosité et le potentiel venteux du site. L'énergie nécessaire pour la transmission de données est très faible. Il suffit d'un petit panneau photovoltaïque mais la législation impose de disposer un feux d'obstacle rouge au sommet. C'est pourquoi vous verrez également plusieurs gros panneaux photovoltaïques accrochés au milieu du mât. L'idéal est de mesurer le vent sur au moins une quinzaine de mois. Certaines années sont venteuses, d'autres moins. Mesurer le vent le même mois deux années consécutives permet de savoir si le site est sensible à ce phénomène de variation annuelle de vent.



Matériaux composites

Un matériau composite est l'assemblage de plusieurs matériaux de nature différente dont les qualités se complètent en donnant un matériau hétérogène dont les performances globales sont supérieures à l'un des composants. Il est constitué d'un renfort et d'un liant. Pour diminuer le poids de l'ensemble fixé au bout du mât, les fabricants ont choisi, pour la coque de la nacelle et les pales, un matériau composite avec la fibre de verre comme renfort et une résine thermodurcissable (souvent du polyester ou de la résine époxy) comme liant. Ce sont les tissus de fibre de verre qui apportent la rigidité à la pale. La technique de fabrication qui permet d'obtenir un plus grand pourcentage de tissus par rapport à la résine est le moulage par infusion sous vide. Dans un moule rigide qui prend la forme de la pale, les renforts sont disposés à sec et recouverts d'une bâche. Le vide est fait sur les tissus. La résine est infusée par des canaux disposés périodiquement, attirée par la dépression. Ce procédé est maintenant utilisé dans l'industrie nautique pour réaliser la coque des dériveurs.

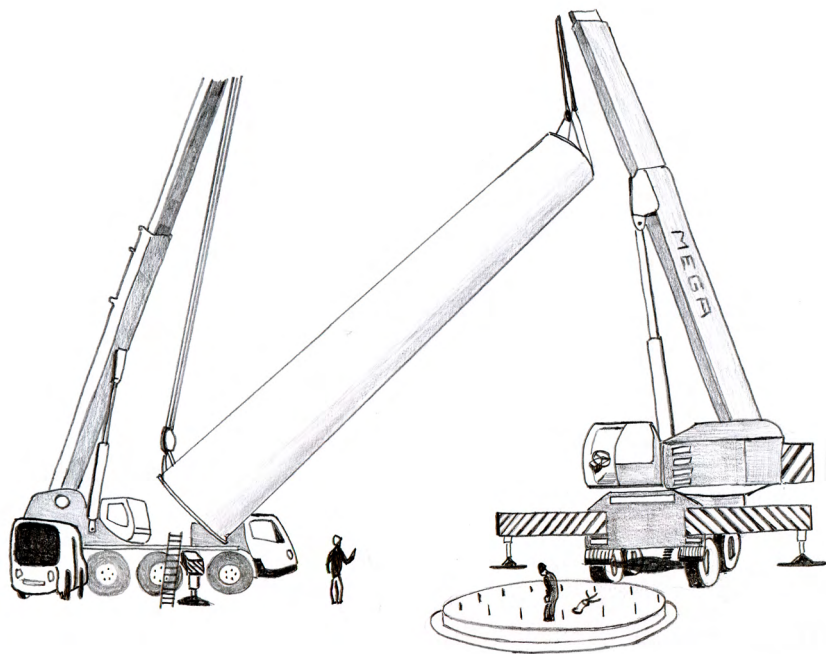
Modélisation acoustique

Le bruit des éoliennes est une des principales craintes des riverains d'un parc éolien. Les développeurs utilisent les fonctions d'un logiciel qui réalise une modélisation informatique du site éolien et estime l'impact sonore des éoliennes dans les différentes configurations de vitesse et de direction du vent. On appelle modélisation acoustique le résultat de cette étude.

Montage d'une éolienne

Le montage d'une éolienne comporte deux étapes, le positionnement et le vissage des sous-ensembles d'une part, le raccordement des équipements et la pose du câble électrique haute tension d'autre part. Ce montage dure un à trois jours suivant la taille de la machine. Nécessitant deux immenses grues, il est réalisé par une équipe spécialisée, l'opération se faisant sur un site venteux. L'équipe travaille parfois la nuit pour préparer et élinguer des sous-ensembles mais le hissage ne s'effectue généralement pas avant l'aube. On assemble d'abord les tronçons du mât, puis la nacelle, enfin le rotor. Ce dernier est constitué au sol et l'hélice est placée sur le bout d'arbre de la nacelle. Lorsque le poids du rotor est trop important, le moyeu est assemblé seul sur la nacelle et les pales sont mises en place l'une après l'autre en haut du mât.

Le montage sera suivi d'une phase de tests qui durera quelques semaines le temps de charger et déverminer les logiciels, les adapter aux conditions du site, régler les capteurs, réaliser des essais de tous les équipements et procéder aux dernières vérifications dont les procédures d'arrêt d'urgence. C'est une autre équipe qui réalise cette phase très technique.



Moulin à vent

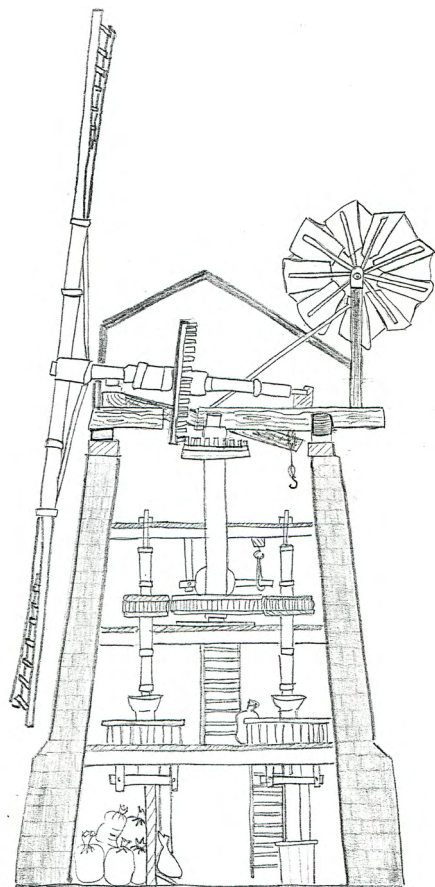
Ancêtres des éoliennes, les moulins à vents récupéraient l'énergie du vent pour produire l'énergie mécanique nécessaire au broyage des grains de blé. À l'époque, c'étaient des réalisations de haute technologie. Des engrenages en bois transmettaient le mouvement de rotation de l'axe du rotor aux meules. Chaque village perché en hauteur avait son propre moulin à vent. Les quatre ailes étaient équipées de toile pour prendre le vent. Selon la force du vent, le meunier mettait plus ou moins de toile sur les ailes.

Moulin chandelier

Dans cette configuration, le corps complet du moulin pivote. Le meunier pousse une solide barre liée à la structure en bois du corps de moulin pour l'orienter face au vent.

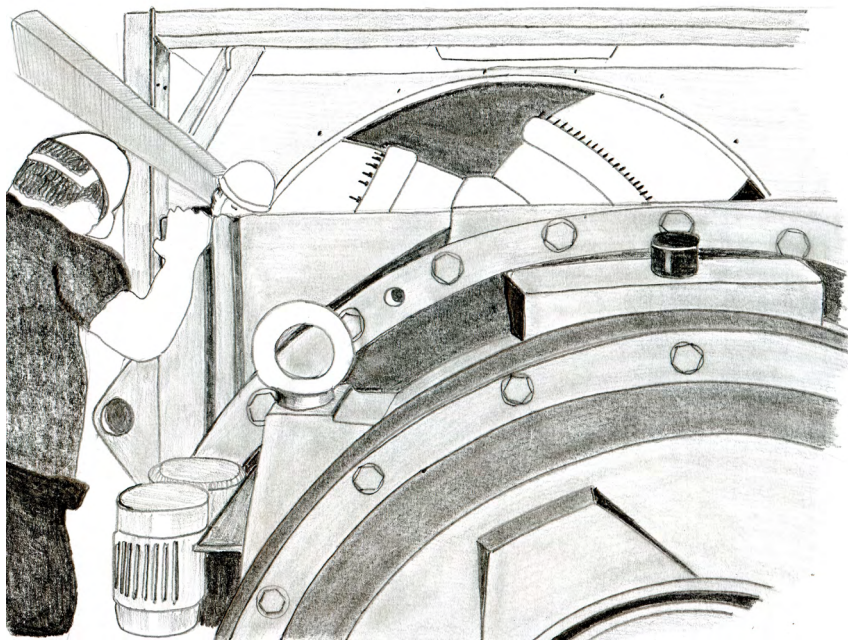
Moulin tour

Dans un moulin tour, le corps du moulin est maçonné. Seul le toit orientable qui possède les quatre ailes, l'arbre du rotor et la première roue dentée, pivote.



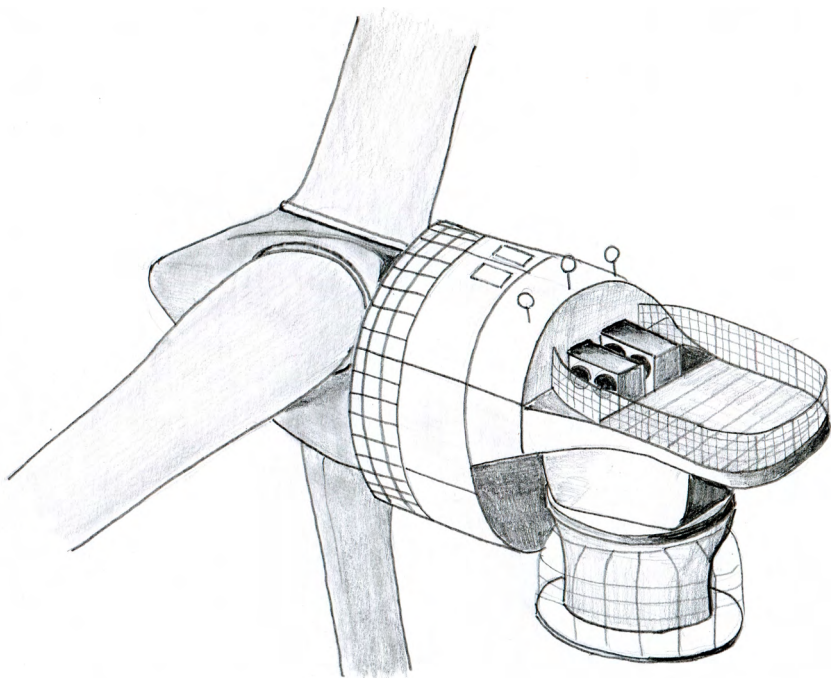
Multiplicateur de vitesse

Les premières éoliennes de production d'électricité ont été construites en s'inspirant des alternateurs industriels dont le rotor tourne à 1 500 tours/minute. Comme les pales d'une éolienne tournent moins vite, il faut augmenter la vitesse de rotation de leur axe en interposant un multiplicateur entre celui-ci et le rotor de l'alternateur. Comme dans un moulin à vent, ce sont des engrenages qui réalisent cette augmentation de vitesse sauf qu'ils sont en acier et contenus dans un carter. Dans le jargon éolien, on appelle « *gearbox* » un multiplicateur. Certaines machines se passent de *gearbox*, leur alternateur étant conçu pour fonctionner à vitesse lente.



Nacelle

La ligne de production d'électricité d'un aérogénérateur depuis l'axe de l'hélice jusqu'à l'alternateur, est posée sur un châssis métallique et entourée d'un capot en matériau composite. C'est la nacelle. Elle est assemblée en usine et hissée d'un seul tenant au sommet du mât éolien où elle y est maintenue par l'intermédiaire d'une couronne d'orientation. La forme extérieure de la nacelle est caractéristique de la marque de l'éolienne.

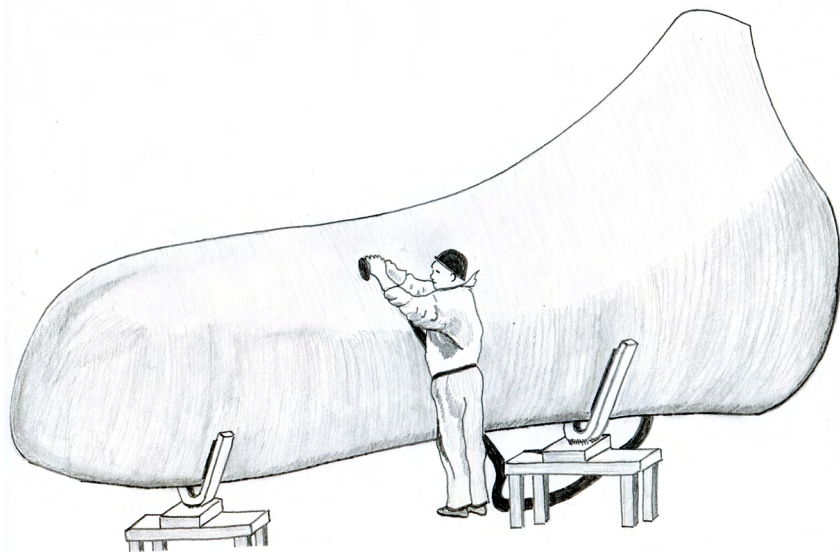


Pale

Réalisées en matériau composite, les pales sont soumises à des efforts cycliques bien différents de ceux des pales d'avion. Elles sont calculées pour résister plus de vingt ans et subissent des tests de résistance impressionnants. Les pales d'un seul tenant ont atteint les dimensions maximum pour pouvoir circuler sur le réseau routier (Siemens fabrique des pales de 75 mètres de longueur d'un seul tenant). Les fabricants imaginent des pales en plusieurs parties et essaient d'autres renforts (fibre de carbone par exemple) et d'autres résines que le polyester.

Les profils d'une pale sont définis pour qu'elle prenne correctement le vent aux différentes plages de vitesses avec un minimum de bruit. Le sifflement du vent en bout de pale est un phénomène que les ingénieurs cherchent constamment à réduire. Il suffit d'observer les pales de différents modèles d'éolienne pour se rendre compte de la créativité des ingénieurs pour réduire le bruit et augmenter la portance.

Pour former un rotor les pales doivent être de même poids et équilibrées pour qu'elles ne transmettent pas de vibrations à la mécanique. Par exemple, il ne faut pas une différence de poids supérieure à 3 kg entre les pales d'un rotor d'un diamètre de 96 mètres. Si un agent de maintenance doit retirer de la matière pour pouvoir réparer un impact, il devra remettre la même quantité de matière.



Pale en drapeau

En cas de tempête, les pales sont orientées perpendiculairement au vent (incidence nulle) et l'hélice de l'éolienne est bloquée. On dit qu'elles sont en drapeau.

Paquet climat-énergie

Ayant fait l'objet d'un accord entre les chefs d'états de l'Union européenne, ce plan climat a été adopté le 23 janvier 2008. Il vise à tenir les objectifs appelés communément « 3 × 20 » à l'horizon 2020 c'est-à-dire :

- inclure 20 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique ;
- réduire les émissions de CO₂ des pays de l'Union de 20 % ;
- accroître l'efficacité énergétique de 20 %.

Parc éolien

Un parc éolien est un ensemble d'aérogénérateurs de même marque, appartenant à un même propriétaire et transmettant l'énergie électrique produite par un seul raccordement au réseau. Sur un grand territoire propice à l'énergie éolienne, les parcs peuvent se côtoyer. Avant qu'un parc soit opérationnel, un plan d'intervention est établi avec les pompiers. Ils savent quel chemin mène à quelle éolienne. Il est peu probable que tous ces chemins soient connus des GPS. En cas d'accident, les agents de maintenance ne peuvent se contenter d'appeler les secours. Ils travaillent par équipe et sont formés à se porter mutuellement assistance.

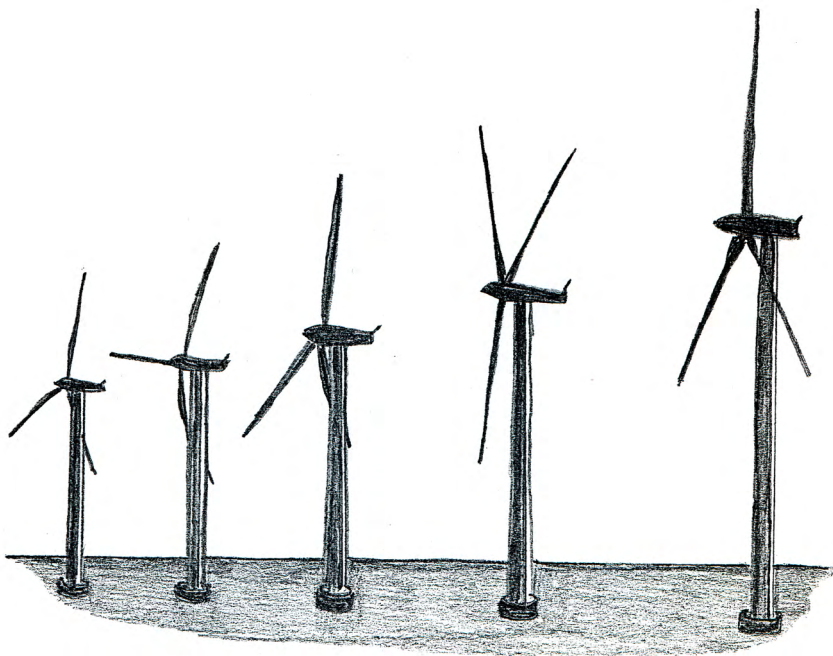
Parc éolien *off-shore*

Il s'agit d'un parc éolien construit en mer. De nombreux pays qui ont une façade maritime se tournent vers la construction d'éoliennes sur l'eau. Les constructeurs ont imaginé des machines flottantes géostabilisées ou ancrées au fond de l'eau par des pieux en béton. Ce choix de parc éolien comporte trois avantages :

- la location du « terrain » revient moins chère qu'en bord de mer où la pression immobilière est importante ;
- aucune pollution visuelle ne gêne les riverains. Les constructeurs peuvent envisager des machines de dimensions impressionnantes de capacité supérieure à 8 MW ;
- comme ce sont les inégalités de terrain, le boisement et les immeubles qui altèrent le flux venteux et le rendent plus turbulent, le vent est plus puissant et régulier en mer. Mais les challenges à relever sont colossaux. L'humidité et l'environnement salin augmentent considérablement la corrosion. L'acheminement et la dépose des équipes de maintenance demandent le respect de procédures rigoureuses et imposent une formation complémentaire aux techniciens. En cas de tempête, l'accès au parc est impossible ce qui nécessite une capacité accrue à résoudre les problèmes à distance. Le parc doit limiter les perturbations de la pêche et du trafic maritime. Transporter en toute sécurité le courant électrique haute tension jusqu'à la côte n'est pas simple à réaliser et un poste source doit être installé près du rivage pour traiter et répartir le courant électrique.

En 2012, 2013 et 2014, la France a lancé plusieurs appels d'offre de parcs éoliens *off-shore*. De très grandes entreprises françaises comme Areva et Alstom y ont répondu. La grande question pour les entreprises qui ont remporté les marchés est de savoir si la rentabilité sera au rendez-vous, conformément au plan de charge.

Les entreprises se donnent tous les moyens de réussir, la France souhaitant devenir la nation de référence pour l'éolien *off-shore*.



Permis de construire

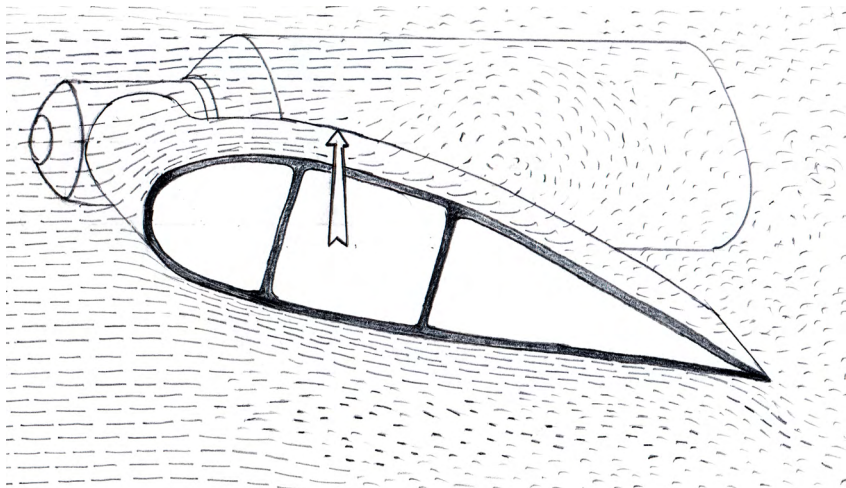
C'est ce qu'on appelle communément l'ensemble des tâches administratives à mener pour obtenir l'autorisation d'exploiter un parc éolien. Depuis que les parcs éoliens sont soumis à l'ICPE, c'est un parcours compliqué qui exige deux à trois ans de travail. Parmi les tentatives de créer un parc éolien, rares sont celles qui aboutissent à la mise en place d'éoliennes au bout de ce laps de temps. Il peut arriver que l'opposition de la population décourage le développeur ; il peut arriver qu'un problème technique (comme la proximité d'un site classé comme le mont Saint-Michel) interrompe le processus ; il peut arriver que le développeur n'arrive pas à lever les fonds nécessaires à l'achat des machines ; il peut arriver que les machines préconisées ne soient pas immédiatement disponibles ; enfin il peut arriver que le permis de construire soit accordé mais pas exploité. Les sociétés de développement éolien ont plusieurs projets en chantier en même temps. Le manque à gagner de l'arrêt d'un projet est compensé par la réussite d'un autre.

Pitch

Pour tirer le meilleur profit du vent, les pales de la plupart des éoliennes de production d'énergie électrique, sont articulées autour de leur axe longitudinal pour orienter leur profil suivant la force du vent. *Pitch control system* est le logiciel informatique qui calcule en permanence l'angle d'incidence optimal des pales et donne l'ordre aux actionneurs de les orienter. Certaines éoliennes de faible puissance possèdent un *pitch* rudimentaire. Il s'agit d'un vérin dont la tige pousse des biellettes qui entraînent le pivotement des pales selon un même angle. Sur les aérogénérateurs des dernières générations, les pales sont équipées d'une couronne d'orientation sur laquelle engrène un pignon monté en bout d'arbre d'un moteur électrique asservi. Chaque moteur est mis en mouvement de manière indépendante par le *pitch control system*. À chaque instant les pales peuvent avoir un angle d'incidence différent adapté au vent qui les touche.

Portance d'une aile

Le C_z , coefficient de portance, caractérise la sustentation d'une aile. La force de portance est la composante perpendiculaire à la direction du vent de la force du vent sur la surface de la pale. Elle dépend du C_z , de la densité du fluide et de sa vitesse ainsi que de la surface présentée par la pale face au fluide. C'est la force de portance qui fait tourner les pales d'une éolienne classique comportant trois pales sur un axe horizontal. L'objectif d'un aérodynamicien est d'élaborer le profil d'une pale caractérisée par un bon coefficient de portance et un faible coefficient de traînée, ce dernier se répercutant sur le mât. La force de portance est due à une surpression du vent sous la pale et une dépression au dessus.



Poste source

Le réseau électrique comporte des lignes à haute tension, des lignes moyenne tension et le réseau domestique d'une tension de 230 volts. On ne peut pas raccorder un parc éolien n'importe où. Un parc éolien est relié au réseau par un poste de raccordement d'une tension de 10 000 à 30 000 volts appelé poste source. Plus le territoire est gourmand en électricité, plus il comporte de postes sources et plus ils sont importants. Sur un territoire, on ne trouve pas un poste source tous les kilomètres. Un promoteur éolien se préoccupe de la distance de son site éolien à sa possibilité de raccordement la plus proche. Plus elle est éloignée, plus le coût de raccordement sera important. Il sera difficile de rentabiliser un parc éolien s'il faut creuser 40 kilomètres de tranchées pour y enfouir les câbles électriques.

Potentiel éolien

Pour pouvoir dimensionner un parc, il est très important de déterminer combien on peut tirer d'énergie électrique d'un site venteux. Le potentiel éolien exprime sur une année le nombre d'heures où une éolienne fonctionne à plein régime. Bien évidemment lorsque le vent ne fait travailler une éolienne qu'à une puissance partielle, on fait une péréquation pour déterminer l'équivalent de temps d'une production à pleine puissance. Une année comporte 8 760 heures. Un potentiel de 3 500 heures est extrêmement favorable. On le trouve généralement en bord de mer. Un potentiel de 3 000 heures correspond à un excellent site à l'intérieur des terres. À l'intérieur des terres, les rafales de vents sont moins fortes et fatiguent moins les machines. Elles sont moins susceptibles de rencontrer de problèmes techniques. Un parc éolien peut y être aussi rentable qu'en bord de mer surtout que la pression immobilière est moins forte et l'opposition de la population moins virulente si la région n'est pas touristique.

Production annuelle

Il s'agit de la quantité de courant qu'une éolienne fournit en une année. Elle est exprimée en kilowattheure. La production envisageable du site sur lequel se dresse l'éolienne a été estimée au moment de l'étude du parc. Plus la production réelle s'approche de cet indicateur, meilleure est sa productivité.

Producteur d'énergie électrique éolienne

C'est un autre nom pour un exploitant de parc éolien.

Promoteur éolien

Un promoteur immobilier est une personne qui s'engage à faire construire un immeuble pour le vendre. Il s'assure de la disponibilité du terrain, des aspects réglementaires et des moyens de financement les plus adaptés. Un développeur éolien a la même activité sauf qu'il propose un parc éolien. C'est pourquoi on l'appelle également promoteur éolien, terme plus facile à comprendre pour le grand public.

Protocole de Kyoto

Un traité international a été signé par de nombreux états à Kyoto, au Japon, le 11 décembre 1997 sur les changements climatiques. Visant à réduire de 5,2 % les émissions de gaz à effets de serre entre 2008 et 2012, il a été ratifié par 168 pays en 2010. Les mesures prises par chacun de ces états constituent la plus grande part de l'effort de réduction, trois mécanismes internationaux venant en complément des politiques nationales : le mécanisme de permis négociables, le mécanisme de développement propre et la mise en œuvre conjointe.

Puissance instantanée

La puissance électrique qu'on peut tirer du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse. Par vent faible, l'éolienne fournit une puissance instantanée bien inférieure à celle indiquée sur la génératrice. Cette puissance est affichée sur l'armoire de commande en bas du mât. Elle est également transmise à distance au centre de surveillance du parc.

Puissance maximale

Il s'agit de la puissance plaquée, c'est-à-dire celle indiquée sur la plaque d'identification apposée sur le capot de la génératrice. En produisant de l'électricité, une génératrice s'échauffe. Les fabricants définissent, avec attention, la valeur de cette puissance maximale qui doit permettre à la génératrice de fonctionner longtemps à plein régime sans se dégrader.

Qualité de l'électricité

Pour être injectée dans le réseau électrique, l'électricité doit être conforme aux caractéristiques exigées. Nous connaissons la tension, l'intensité et la fréquence d'un courant. Il existe bien d'autres caractéristiques à respecter. L'électricité produite instantanément par une éolienne est filtrée, traitée dans des dispositifs électroniques pour la rendre compatible au réseau. Si la qualité n'est pas obtenue, automatiquement l'éolienne est désaccouplée du réseau. Cependant si, à un instant donné, une défaillance extérieure crée une perturbation sur le réseau, les parcs éoliens peuvent participer au rétablissement de la qualité du courant.

Réseau européen EWIS

Les réseaux électriques nationaux sont tous constitués différemment ce qui les rend parfois incapables de redistribuer l'électricité des territoires excédentaires vers les zones déficitaires surtout si une frontière sépare ces territoires. L'excès d'électricité qu'il est difficile de redistribuer, génère des coûts analogues à un embouteillage routier. EWIS – *European wind integration study* – est une initiative des opérateurs européens de transmission d'électricité (ETSO) en collaboration avec la commission européenne. Elle utilise les résultats de projections des besoins électriques immédiats et à long terme pour faciliter l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux. En effet certains craignent qu'on ne puisse intégrer plus de 20 % d'énergie éolienne sans modernisation coûteuse des réseaux. Une plus grande intégration de l'énergie éolienne nécessitera la mise en place d'un nouveau système de contrôle de commande pour le réglage de la tension, de la fréquence et le filtrage des harmoniques. C'est sur quoi l'ETSO travaille.

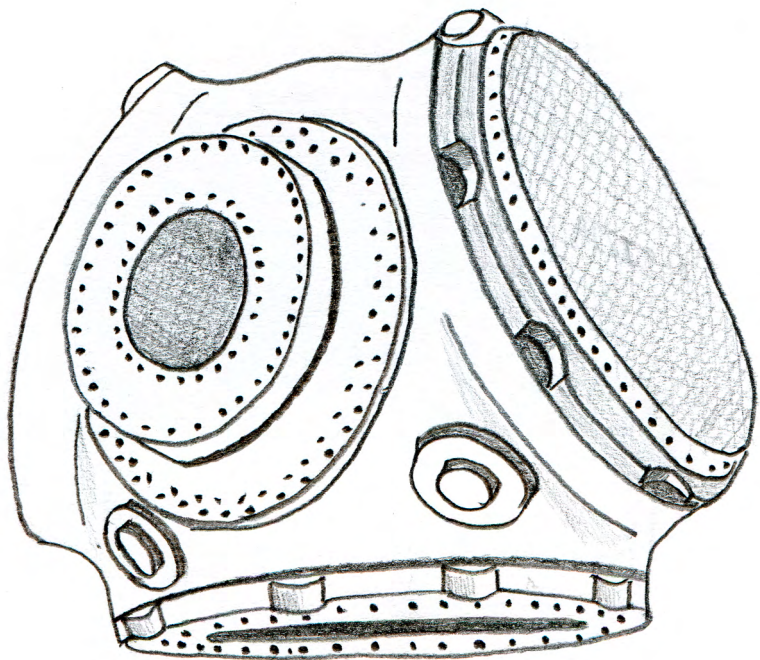
Risques liés à la maintenance

Si les procédures et règles de sécurité sont respectées, les risques auxquels sont exposés les techniciens de maintenance ne sont pas plus importants qu'un travail en usine. Mais les métiers de la maintenance sont ceux qui apportent le plus lourd tribut aux accidents du travail. Il existe des risques de brûlure, certains organes étant susceptibles de monter en température comme les freins ou la génératrice, des risques électriques. Les techniciens doivent être habilités pour travailler dans cet environnement qui comporte des câbles électriques de forte tension. Ils réalisent des changements de pièces mécaniques, ce qui comporte des risques de pincement, de blessure, de chute d'objets sur les pieds.

L'espace est restreint dans la nacelle et situé à une certaine hauteur. Il faut faire attention à ne pas trébucher. Les techniciens sont formés à la sécurité du travail en hauteur. Leur formation les prépare à évacuer une nacelle en toute sécurité et à secourir leur collègue en difficulté. Les techniciens de maintenance travaillent toujours par deux, parfois en équipe de trois personnes pour les très grosses éoliennes.

Rotor

Très grossièrement, un moteur électrique se compose d'un stator et d'un rotor. Le stator a la forme d'un cylindre creux qui reçoit le courant électrique. À l'intérieur du stator, le rotor est un axe équipé de bobinages ou d'aimants qui se met en rotation grâce aux champs magnétiques créés par le stator. L'extrémité du rotor est équipée d'un pignon ou d'une poulie afin de transmettre le mouvement de rotation. Dans le jargon éolien, on appelle rotor l'hélice constituée par les pales et le moyeu. Le dessin ci-contre représente un moyeu de rotor d'éolienne avec ses trois brides de fixation de pale et celle de l'arbre de rotation principal.



Savonius

L'ingénieur finnois Sigurd Savonius a breveté le principe d'une éolienne à axe vertical en 1929. Elle est peu encombrante, économique et esthétique. Son rotor est composé de deux demi-cylindres désaxés. L'écoulement d'air qui aborde la pale face à lui va être dévié par le profil semi cylindrique et envoyé vers la seconde pale. Grâce à cette astuce, une éolienne Savonius démarre à une vitesse de vent moindre que les autres. Le prototype créé par Savonius n'a jamais produit d'électricité, la vitesse de rotation du rotor étant trop faible. Quelques lampadaires éoliens et autres éoliennes domestiques reprennent ce principe.

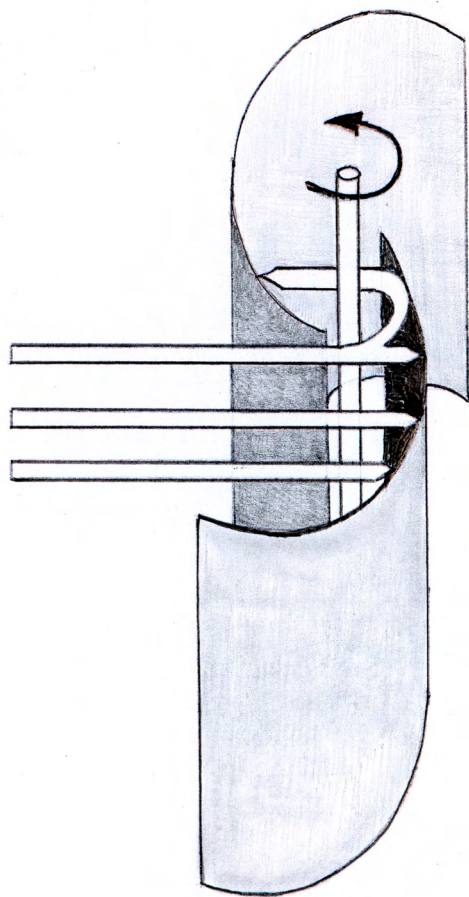


Schéma régional éolien

Depuis la loi Grenelle II votée en 2010, chaque région doit établir un schéma régional éolien en cohérence avec les objectifs européens sur l'énergie et le climat. Il prend en compte les ZDE déjà déterminées avant son élaboration. ZDE et schéma régional éolien compliquent le travail des développeurs mais permettent d'assurer une implantation harmonieuse des éoliennes sur le territoire français.

Servitude

Pour être certain de pouvoir implanter ses éoliennes, un développeur fait signer un contrat d'exclusivité aux agriculteurs qui possèdent des terres sur le territoire concerné par le parc en étude. Ce contrat promet à ces derniers de recevoir annuellement une certaine somme d'argent si une éolienne est installée sur leurs terres et garantit que l'agriculteur ne pourra traiter avec aucun concurrent. Mais c'est seulement à la fin de l'étude que seront définis les emplacements exacts des machines. Une grande proportion des parcelles de terre ne recevra pas d'éoliennes mais certaines devront laisser passer les câbles électriques enfouis dans le sol. Pour cette servitude qui nuit à une exploitation normale de la parcelle, l'agriculteur sera indemnisé.

***Stall* : décrochage aérodynamique**

Équiper une éolienne d'un système de réglage de l'angle d'incidence des pales, revient cher. C'est pourquoi les machines rustiques de faible puissance sont équipées d'un « rotor *stall* » au lieu d'un « rotor avec *pitch* ». Les pales sont fixées rigidement sur le moyeu du rotor. Elles ont un profil particulier qui favorise le décrochage aérodynamique, c'est-à-dire le ralentissement du rotor. À partir d'une certaine vitesse de vent, des perturbations apparaissent sur les filets d'air qui entourent une pale et gênent la pale suivante, la forçant à ralentir. Un tel rotor est censé se réguler tout seul en vitesse de rotation. Néanmoins, il faut pouvoir arrêter les pales en cas de tempête, l'absence de *pitch* ne permettant pas de mettre les pales en drapeau. C'est pourquoi ces pales sont équipées d'un volet en bout de pale qui pivote pour aider les pales à s'arrêter comme les volets d'une aile d'avion à l'atterrissage. La mise en rotation du volet s'effectue par un câble commandé lorsque la vitesse de vent atteint la consigne de vent maximal autorisé.

Tarif d'achat

Pour aider au démarrage des filières d'énergies renouvelables, les pouvoirs publics français ont décidé en 2008 d'imposer à EDF un tarif d'achat de l'électricité produite par un producteur d'énergie verte. Sauf changement de législation, ce tarif d'achat était garanti 15 ans, indépendamment de toute augmentation des matières premières et bien supérieur au tarif auquel EDF vend son électricité. En mai 2014, le Conseil d'État a annulé ce tarif bonifié qui avait été attaqué par une association anti éolienne. Aussitôt, le ministère de l'écologie a soumis un nouvel arrêté à la Commission de régulation de l'énergie et au Conseil supérieur de l'énergie. Un particulier qui produirait de l'électricité par une éolienne, a plus d'intérêt à vendre sa totalité de sa production plutôt que de l'utiliser lui-même et de ne vendre que son surplus. Pour l'éolien, le tarif varie selon trois critères :

- le parc est terrestre ou en mer ;
- il a plus ou moins de 10 ans d'existence ;
- la valeur de son potentiel éolien (cinq intervalles entre 2 400 heures et 3 600 heures).

Télesurveillance

Une éolienne est un équipement industriel de haute technologie constamment surveillé à distance. Un logiciel de supervision capte les paramètres extérieurs (vitesse et direction du vent, pression atmosphérique, température de l'air...) et de nombreux paramètres internes (fréquence de rotation du rotor, puissance instantanée produite, température de composants, pression et débit, usure de plaquettes de frein...). Ces caractéristiques sont envoyées périodiquement à un centre de surveillance qui agit dès qu'une éolienne montre des défaillances. Dans 80 % des cas, à distance, il peut remettre en route une éolienne arrêtée. Il donne des indications à l'équipe de maintenance qui visite l'éolienne pour orienter ses investigations s'il constate que quelques indicateurs n'évoluent pas comme prévu.

Théorie de Betz

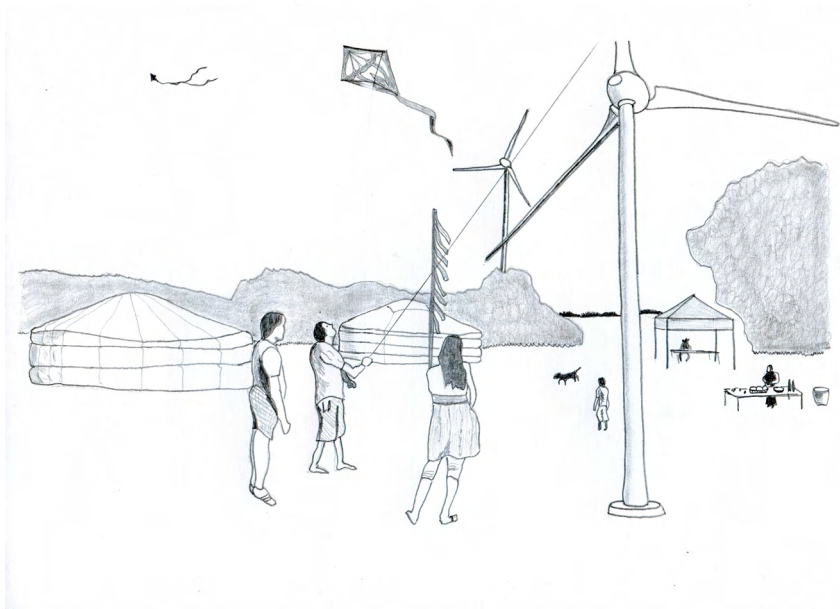
La production d'énergie électrique se fait au préjudice de l'énergie cinétique du vent. Un canal venteux d'un diamètre égal au diamètre du rotor d'un aérogénérateur apporte une certaine énergie. D'un point de vue strictement physique, l'ingénieur allemand Albert Betz a calculé en 1919 la puissance maximale qu'on peut tirer de ce canal fluide. Il est impensable que le vent n'ait plus aucune vitesse en aval d'une éolienne. L'efficacité théorique d'une éolienne ne peut atteindre que 59 % de la limite déterminée par la formule de Betz. En pratique une éolienne industrielle atteint à peine 35 % de cette limite physique. On fait souvent référence à un pourcentage de limite de Betz dans les documents publicitaires pour justifier la performance de la machine vantée par les prospectus.

Trainée d'une pale

Tout le monde connaît le C_x , coefficient de trainée aérodynamique. Pour une automobile comme pour un avion, plus sa valeur est faible, moins le moyen de transport consomme de l'énergie pour vaincre la résistance de l'air. La force de trainée (qui dépend du C_x , de la densité du fluide et de sa vitesse ainsi que de la surface présentée par l'objet face au fluide) est parallèle à la vitesse résultant d'un corps sur un fluide. Certaines architectures d'hélices éoliennes les font tourner grâce à la force de trainée.

Tourisme vert

Non seulement un grand nombre de touristes n'est pas gêné par la présence d'éoliennes, les parcs éoliens faisant l'objet de visites touristiques, mais certains voyageurs organisent même des circuits qui font une halte sur les parcs éoliens remarquables.



Vibrations

Le fonctionnement de machines tournantes engendre des vibrations. Dans une éolienne, lorsque le vent est bien établi, les pales passent devant le mât à intervalles réguliers, générant certaines fréquences de vibration, il en va de même dans un multiplicateur de vitesse entre une dent d'un pignon qui engrène avec une roue dentée. Si ces fréquences sont voisines ou proportionnelles, il risque de se produire un phénomène de résonance préjudiciable à la durée de vie de l'éolienne. Les ingénieurs étudient avec attention l'effet de ces vibrations combinées.

Vitesse de synchronisme

Un alternateur est construit pour fournir de l'électricité à une certaine fréquence de rotation de son rotor. Comme le vent n'a pas une vitesse parfaitement constante, le rotor de l'alternateur subit quelques variations de vitesse. Des dispositifs électroniques permettent de fournir de l'électricité dans une plage de fonctionnement autour de cette vitesse de synchronisme.

Vitesse de vent de coupure

C'est la consigne de vitesse de vent pour laquelle l'éolienne se coupe du réseau électrique, arrête son rotor, oriente les pales en drapeau et se met en sécurité. Plus la vitesse de coupure est grande, plus longtemps l'éolienne tournera et meilleure sera sa productivité.

Vitesse de vent de démarrage

Située autour de 4 à 5 m/s, c'est la vitesse de vent à partir de laquelle l'éolienne commence à produire du courant. En-dessous de cette vitesse, les constructeurs choisissent soit de bloquer le rotor pour éviter l'usure des pièces mécaniques, soit de le laisser tourner à vide. Une éolienne qui tourne, fait meilleure impression sur le voisinage qu'une machine inerte.

Yaw

Le mouvement de *yaw* est la rotation de la nacelle autour de son mât afin de l'orienter par rapport à la direction du vent. L'information de direction de vent est donnée par la girouette placée au dessus de la nacelle. Certains aérogénérateurs prenaient le vent par l'arrière. Les filets de vents étaient perturbés par la nacelle avant d'atteindre les pales. Maintenant toutes les machines présentent leur rotor face au vent. Le vent est parfois capricieux, changeant souvent de direction et parfois très légèrement. Pour éviter à la nacelle de jouer au yoyo, une routine informatique ne donne l'ordre de rotation que si le vent s'est orienté d'un nombre minimum de degrés et s'est stabilisé dans cette direction un minimum de temps. Une fois la nacelle en position, un frein bloque son mouvement.

ZDE : Zone de développement éolien

Introduites par le Grenelle de l'environnement, les Zones de développement de l'éolien terrestre indiquaient, pour un territoire donné, quelles sont les zones où l'implantation des aérogénérateurs est permise. Les élus territoriaux (communes et communautés de communes) dressent cette carte qui est validée par décret par le préfet du département. Nul permis de construire n'était accepté pour une demande d'implantation en dehors d'une ZDE (sauf pour les éoliennes installées sur un mât d'une hauteur inférieure à 12 mètres). Le tarif d'achat n'était pas garanti si le parc est hors ZDE. Les parcs doivent satisfaire à certaines contraintes, dont le nombre d'aérogénérateurs (cinq minimum) et la distance aux habitations (à 500 mètres au moins des zones destinées à l'habitation qu'elles soient construites ou pas).

Cette notion est maintenant obsolète, les zones d'implantation des éoliennes étant de la compétence des Conseils régionaux avec les *schémas régionaux éoliens*.

Dans la même collection



100 mots pour comprendre

Les arts
de la marionnette

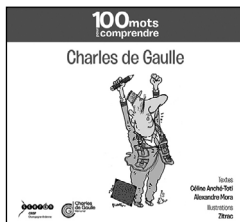
Réf. : 51008B08 - Prix : 7 €
CRDP de Champagne-Ardenne - 2011



100 mots pour comprendre

Le champagne

Réf. : 51000B68 - Prix : 7 €
CRDP de Champagne-Ardenne - 2012



100 mots pour comprendre

Charles de Gaulle

Réf. : 51052B05 - Prix : 7 €
CRDP de Champagne-Ardenne - 2012

De A à Z, 100 mots et 33 illustrations pour comprendre ce qu'est l'énergie éolienne : ses enjeux économiques, géographiques, environnementaux, techniques et politiques. Le lecteur curieux trouvera un ouvrage clair et concis, accessible à tous ceux qui veulent en savoir plus sur la question.