

L'énergie éolienne

ÉRIC FÉLICE [1]

L'éolien s'implante progressivement en France. Mais, très gourmand en espace, il rencontre de plus en plus de résistance, notamment de la part des riverains des parcs éoliens. Son avenir passe donc probablement par des installations en haute mer, où il sera à la fois plus efficace et plus discret.

Mots-clés
efficacité
énergétique,
énergies
renouvelables

Le principe et la technologie

L'éolien semble être le plus abouti et le plus rentable des systèmes d'énergies renouvelables, parce qu'il bénéficie, au niveau technologique, de plus de cent ans d'expérience : la première éolienne produisant de l'électricité a été mise au point en 1887 par le Danois Charles Brush, et depuis, comme dans l'industrie automobile, la technologie n'a cessé de s'améliorer.

Une éolienne est constituée d'un rotor à deux ou trois pales, d'un système de transmission mécanique directe ou à multiplicateur et de circuits de gestion du courant (régulateur, onduleur, etc., selon le type de machine) **1**. L'ensemble se trouve dans la nacelle posée sur le mât, ou la tour, de l'éolienne. Le vent fait tourner les pales qui entraînent le générateur électrique – d'où l'appellation d'*aérogénérateur*. L'électricité produite est soit stockée dans des batteries soit directement envoyée sur le réseau électrique **2**, avec lequel le courant est rendu compatible **3**.

Tous les éléments d'un aérogénérateur font appel à ce que la technologie offre aujourd'hui de mieux : les profils et les matériaux des pales sont issus de l'aéronautique, et les parties électriques ont un rendement avoisinant souvent 100 %, les pertes étant plutôt d'origine mécanique (frottements, rendements des engrenages, etc.). Globalement, ces machines affichent un bon rendement, puisqu'elles sont en mesure de transformer en électricité de 30 à 50 % de l'énergie du vent.

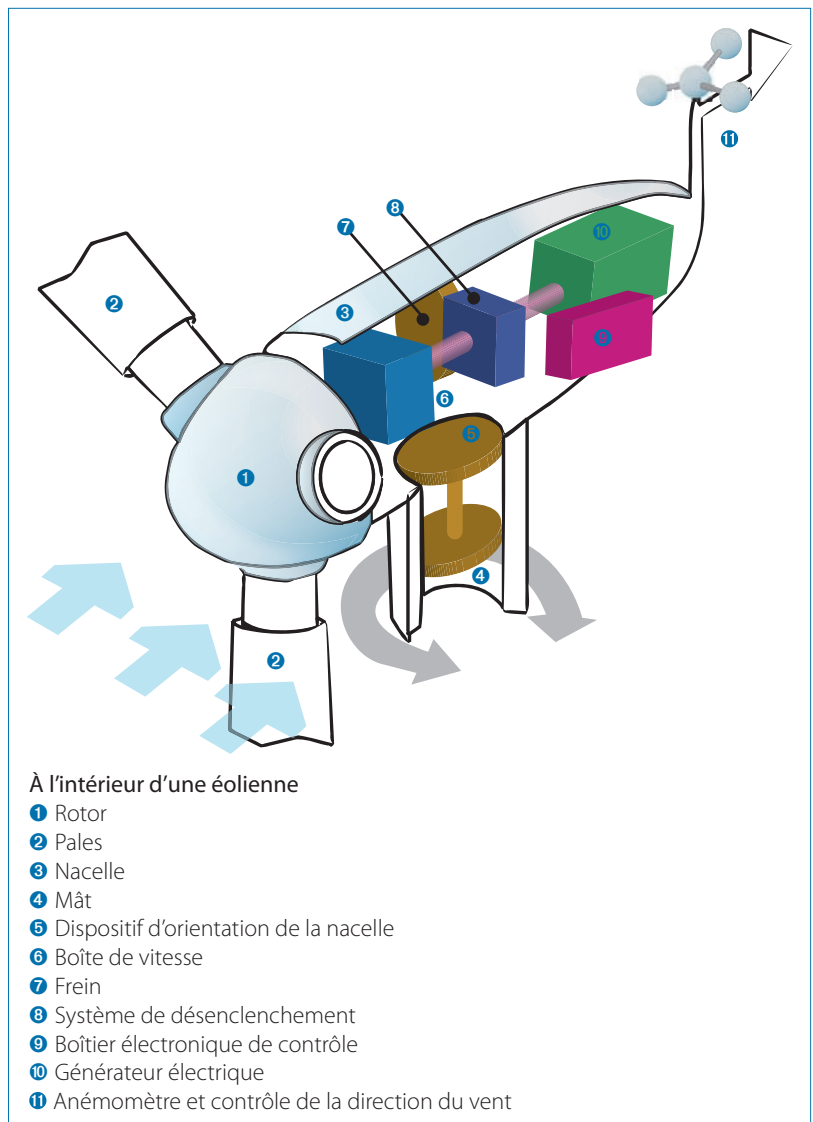
Il existe des éoliennes de toutes tailles. Plus elles sont grandes, plus elles peuvent capter l'énergie cinétique du vent et produire de l'électricité. On les classe généralement en quatre catégories :

- Le très petit éolien :
< 1 kW
- Le petit éolien :
de 1 kW à 36 kW
- Le moyen éolien :
de 36 kW à 350 kW
- Le grand éolien :
> 350 kW

Les très petites éoliennes pour bateau font moins de 60 cm pour une puissance de quelques centaines de watts.

Les éoliennes du petit et moyen éolien ont une taille comprise entre 3 et 30 m. Elles sont particulièrement bien adaptées, par leur taille et leur puissance, à l'équipement des particuliers, des exploitants agricoles, des entreprises et des bâtiments publics.

Quant aux grandes éoliennes industrielles de plusieurs mégawatts, elles



1 Le schéma structurel d'une éolienne

[1] Chef de travaux au lycée Amyot-d'Inville de Senlis (60).

peuvent dépasser les 80 mètres de diamètre.

La puissance des éoliennes augmente selon le carré de leur taille : lorsque l'on double le diamètre d'une éolienne, on multiplie par 4 la surface de vent balayée, et donc par 4 sa puissance de production d'énergie.

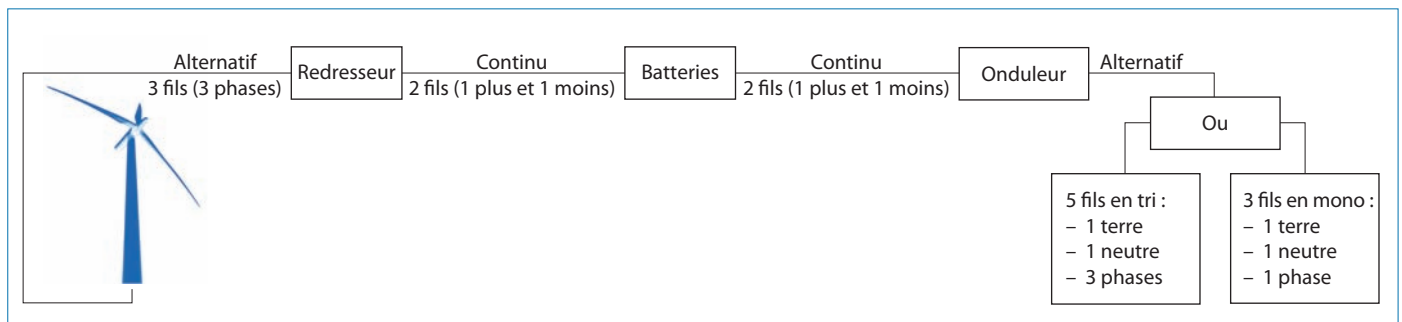
La puissance électrique d'une éolienne s'exprime en watts, kilowatts (kW) ou mégawatts (MW). Elle définit la quantité d'énergie électrique instantanée que l'éolienne produit à vitesse nominale.

La quantité totale d'énergie électrique produite par une éolienne sur une période donnée est généralement exprimée en kilowattheures (kWh), c'est-à-dire la puissance de production multipliée par la durée de production. Par exemple, une éolienne de 5 kW qui tournerait à vitesse nominale pendant 1 000 heures produirait 5 000 kWh.

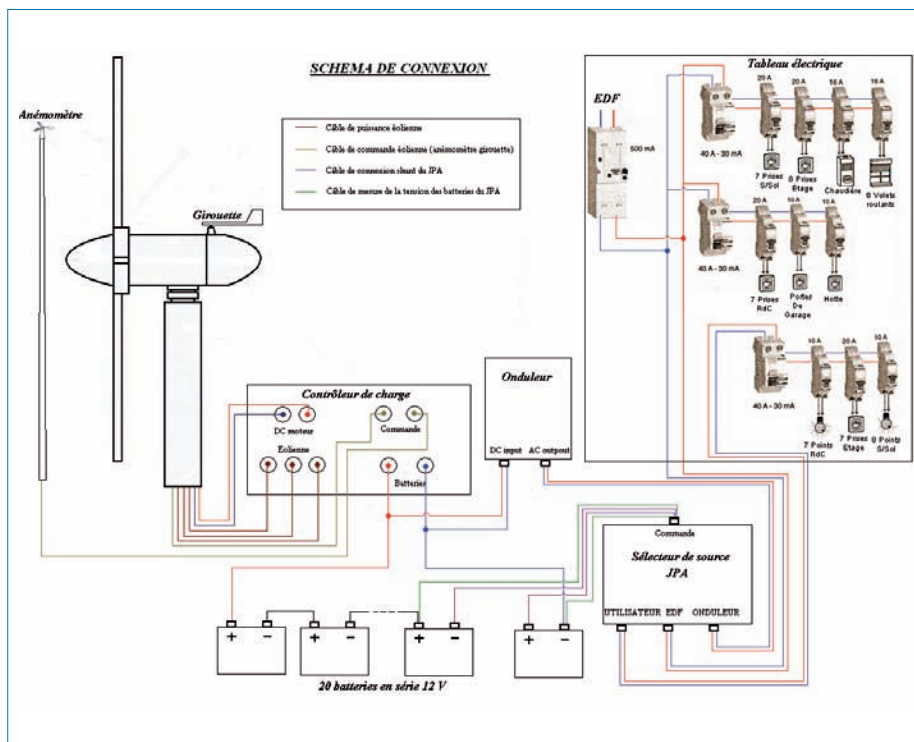
Il existe de nombreuses technologies différentes d'aérogénérateurs, chacune ayant des avantages spécifiques. Les plus courantes sont à axe

horizontal, avec généralement trois pales, mais on en trouve aussi à axe vertical. Utilisant comme les avions la force de portance du vent, ces dernières sont les plus performantes pour les fortes vitesses de vent. Les éoliennes à axe vertical à godet, qui utilisent la force de traînée du vent à la façon des roues à aube de bateaux, ont quant à elles un plus faible rendement énergétique.

Les éoliennes couramment installées aujourd'hui font entre 1,5 et 3 MW. Une machine de 2 MW a un



2 De la production à la distribution d'électricité par éolienne



3 Le mode de raccordement d'une éolienne aux éléments périphériques

Qu'est-ce qu'une zone de développement de l'éolien ?

Une zone de développement de l'éolien (ZDE) désigne un territoire, situé sur une ou plusieurs communes, propice à l'implantation de parcs éoliens. Ce nouvel outil a été mis en place par la loi d'orientation sur l'énergie de juillet 2005. Il est particulièrement important puisque, désormais, pour les nouvelles constructions d'éoliennes, seules celles réalisées dans une ZDE pourront bénéficier de l'obligation d'achat. Avec les ZDE, ce sont les collectivités locales qui prennent en main le développement de l'éolien sur leur territoire et qui fixent les seuils de puissance.

Concrètement, la création d'une ZDE est proposée au préfet par la ou les communes concernées. Elles doivent évaluer le potentiel éolien, définir un périmètre géographique et les seuils de puissance minimaux et maximaux pouvant y être développés, en prenant en compte la protection des paysages, des monuments historiques et des sites remarquables et protégés. Après concertation avec les services de l'État et les collectivités, le préfet valide ou non la ZDE. Pour les développeurs, le système permet d'identifier les sites où les projets de parc pourront être réalisés plus rapidement.



© AUPRÉLIEN CATTINON

4 Des éoliennes terrestres



© PTERJAN

5 Des éoliennes en mer

rotor de 70 à 90 m de diamètre, et la nacelle est perchée sur un mât de 60 à 100 m de hauteur. La hauteur maximale d'une pointe de pale peut donc être de plus de 140 m au-dessus du sol ! Et on ne s'arrêtera pas là : la tendance est en effet à préférer des machines plus puissantes en moins grand nombre pour une installation donnée. Quelques éoliennes de 4,5 MW, 5 MW et 6 MW sont déjà en service, en Allemagne notamment. Plusieurs projets de parcs avec ce type de machines sont en cours, pour des installations sur terre et offshore. Et constructeurs et chercheurs planchent d'ores et déjà sur des machines de 8, 10, voire 15 MW.

La production

La production d'un parc éolien **4** dépend de la qualité de vent du site. En moyenne annuelle, les sites français produisent 2 300 heures (sur 8 760). Pour donner un ordre d'idée, la production d'un parc de 10 MW, soit 4 éoliennes de 2,5 MW, correspond aux besoins d'électricité domestique

hors chauffage de 5 650 foyers, soit près de 15 000 personnes.

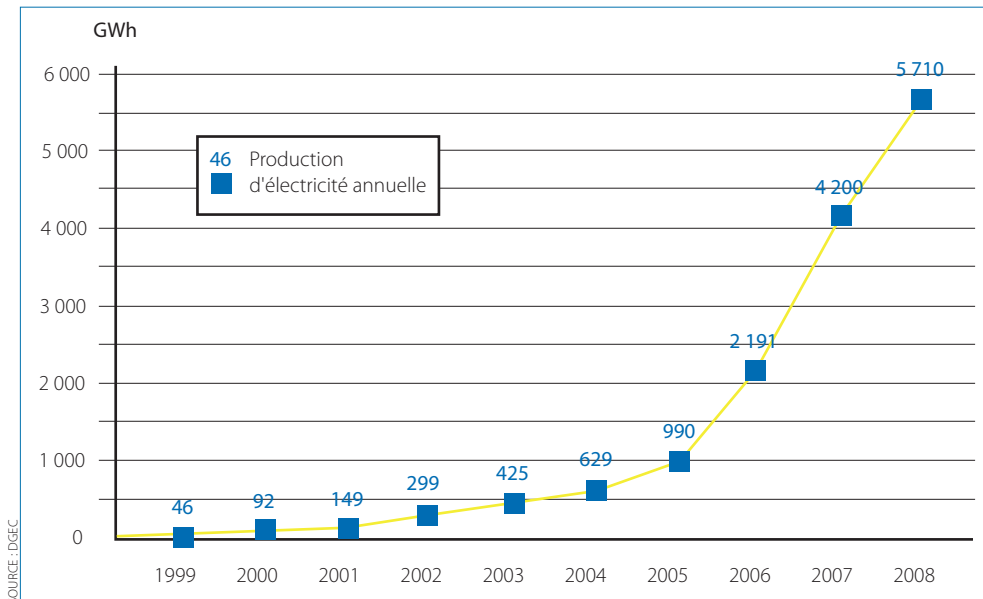
L'offshore

Aujourd'hui encore peu développé, l'éolien offshore a un avenir très prometteur **5**. En mer, les vents sont importants et réguliers, et on sait bien gérer les problèmes d'installation et de maintenance, grâce à l'expérience acquise avec les plates-formes pétrolières. De plus, on dispose d'espace pour installer des éoliennes puissantes en grand nombre : un parc offshore peut rassembler plusieurs dizaines, voire des centaines, d'éoliennes géantes.

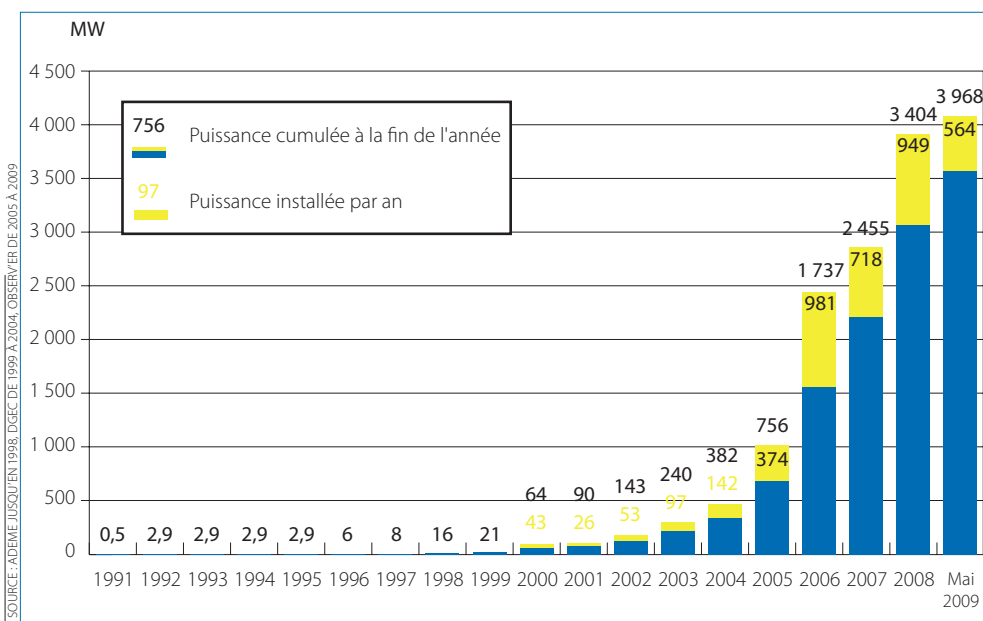
En Europe, 420 MW ont été installés en 2009, pour un total de 2 000 MW. L'un des parcs les plus connus est celui de Horns Rev au Danemark, avec 80 éoliennes de 2 MW.

En France

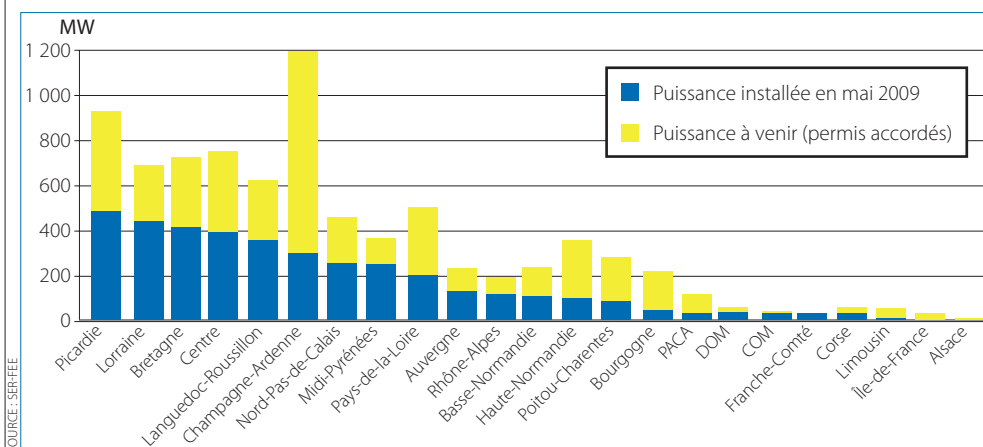
Si la France a démarré avec du retard, la dynamique est désormais lancée **6**. D'après le rapport déposé tout récemment à l'Assemblée nationale par la mission d'information commune sur



6 L'évolution de la production éolienne depuis 1999



7 L'évolution de la puissance éolienne en France depuis 1991



8 La puissance installée et celle accordée par Région en France

l'énergie éolienne, au 31 décembre 2009, la puissance raccordée du parc éolien terrestre était de 4 574 MW répartis sur 731 parcs 7. Le plus important, celui de Fruges, dans le Pas-de-Calais, compte 70 éoliennes pour une puissance installée de 140 MW et peut alimenter une population d'environ 126 000 habitants. Avec 1 036 MW raccordés au cours de l'année 2009, la croissance du parc éolien a été d'un niveau quasi identique à celui de 2008 (1 055 MW). Les installations en attente de raccordement à la fin 2009 étaient au nombre de 471 (dont 466 en métropole), pour une puissance de 4 739 MW (dont 4 727 MW en métropole).

À ce jour, la Picardie est la Région disposant de la plus grande puissance installée, près de 500 MW, devant la Lorraine et la Bretagne, grâce à la mise en service d'une vingtaine de parcs éoliens d'avril 2008 à mai 2009. Les dix premières Régions françaises cumulent à elles seules environ 80 % de la puissance éolienne installée en France 8.



© BLUEH

9 Une éolienne flottante

En 2011, c'est Champagne-Ardenne qui devrait être la première Région de France en termes de puissance installée – dans la mesure où l'ensemble des projets déposés à ce jour seront validés par un permis de construire.

Deux opérateurs se partagent l'essentiel de ce florissant marché, GDF-Suez et EDF Énergies nouvelles, et quelques grands fabricants européens près de 85 % de la puissance installée aujourd'hui en France : Vestas, en tête avec près de 780 MW installés, Enercon, Nordex, Repower, Gamesa et Siemens.

Quant à l'offshore, le premier parc attendu pour 2011 en Seine-Maritime comportera 21 éoliennes de 5 MW. Mais nos fonds marins, sur de nombreuses façades littorales, notamment en Bretagne, atteignent rapidement une profondeur incompatible avec les techniques de construction actuelles, utilisables pour des fonds de 50 mètres au maximum. C'est pourquoi

différents projets d'éoliennes flottantes en eaux profondes sont actuellement en développement en Bretagne (Diwet du néerlandais Blue H Technologies, et Winflo, d'un consortium français d'industriels et de scientifiques renommés) **9**. La première éolienne flottante au monde a été testée avec succès en 2008 en Adriatique.

L'éolien est un secteur économique en croissance rapide en France, avec de multiples activités : fabrication d'éoliennes, études, financement, construction, exploitation, maintenance des parcs éoliens... Côté industrie, Vergnet est leader mondial de la fabrication d'aérogénérateurs de moyenne puissance (jusqu'à 275 kW) ; Areva et Alstom font leur entrée sur le marché de l'offshore et de la grande puissance.

Plusieurs industriels français ont trouvé de nouveaux débouchés avec l'éolien – fabrication de roulements et couronnes (Rollix Defontaine), de

générateurs (Leroy-Somer), de mâts (Sema), de pales (ATV), de câbles (Nexans), de multiplicateurs... –, et près de 150 sociétés interviennent désormais dans le montage de projets, les études techniques et environnementales, l'installation (génie civil, électricité) des parcs ou la maintenance des machines. Ce sont parfois des entreprises indépendantes, mais le plus souvent des filiales de groupes travaillant dans le secteur de l'énergie, qu'ils soient français (EDF, Total, Cegelec...) ou étrangers.

L'installation

Les parcs

L'installation d'un parc éolien est soumise à des règles strictes pour concilier le développement de l'énergie éolienne et la protection du paysage et de l'environnement : permis de construire soumis pour avis à la commission départementale des sites, perspectives

et paysages, étude ou notice d'impact, enquête publique quand la hauteur de mât des éoliennes dépasse 50 m.

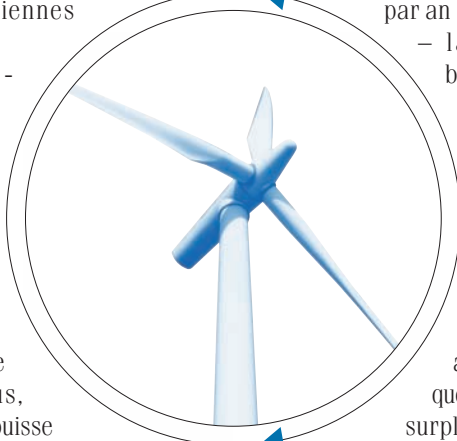
Les développeurs de projets éoliens font généralement appel à des paysagistes pour déterminer l'implantation des aérogénérateurs la mieux intégrée au site. De plus, pour qu'un parc puisse bénéficier du tarif d'achat de l'éolien, il doit désormais être situé dans une zone de développement de l'éolien (ZDE, voir en encadré), pour la détermination de laquelle les communes ont pris en compte la protection des paysages, des monuments historiques et des sites remarquables et protégés.

Chez un particulier ou en collectif

Sur un terrain venté, à l'écart des habitations avec une ligne électrique proche, un particulier peut envisager l'installation d'une éolienne, de préférence d'une puissance inférieure à 50 kW qui sera adaptée à ses capacités de financement. Quelques centaines de machines de ce type sont déjà installées en France.

La configuration d'un projet éolien dépend de nombreux facteurs et n'a pas de modèle unique. Avant toute installation, il est recommandé de connaître le potentiel de son gisement éolien. Météo France fournit des « roses des vents » calculées sur plusieurs années, pour la plupart des cantons de France métropolitaine.

Un mât haut permet généralement de capter des vents plus réguliers et plus rapides, mais augmente le coût. Il est souvent plus raisonnable de rester à une hauteur réduite que de se lancer dans une construction de grande ampleur, d'autant qu'un permis de construire n'est pas nécessaire pour les éoliennes dont le mât ne dépasse pas les 12 mètres (les parties en mouvement ne sont pas prises en compte).



Ces éoliennes peuvent produire en moyenne de 1 000 à 30 000 kWh par an (selon leur taille)

- la totalité des besoins d'une famille tournant autour de 5 000 kWh. Il est possible de choisir entre plusieurs types d'installation :
 - raccordée au réseau électrique avec revente des surplus de production sur le réseau national à un distributeur d'énergie (EDF, Poweo, Direct Énergie, ou autres) ;
 - raccordée au réseau électrique avec stockage des surplus de production ;
 - isolée du réseau avec stockage des surplus de production.

La vitesse du vent varie avec le temps. Une éolienne ne produit pas de l'électricité en permanence ni avec une puissance constante. Il y a donc une différence entre l'électricité produite et celle consommée. Si l'installation intègre une batterie, lorsque le vent souffle fort, le surplus d'électricité est stocké pour être utilisé lorsque le vent sera plus faible ; si elle est raccordée au réseau via un opérateur d'électricité, celui-ci peut racheter le surplus – et il fournira de l'énergie lorsque le vent sera plus faible.

Il faut compter entre 8 000 et 20 000 euros pour l'installation complète d'une éolienne de 0,9 à 20 kW. L'éolien ne bénéficie pas d'aide de l'État au rachat de l'électricité sauf en ZDE, mais les lois de finance 2005 et suivantes prévoient un crédit d'impôt

pour l'installation d'éoliennes sur ou à proximité des résidences principales lorsque l'installation est effectuée par des professionnels. Ce crédit

d'impôt rembourse 50 % du prix de l'équipement éolien, avec un plafond à 8 000 euros pour un couple (+ 200 € par enfant/personne à charge).

Cet « éolien de proximité » présente l'avantage d'être une production électrique décentralisée, qui alimentera les consommateurs des environs par le réseau électrique de distribution.

Une énergie propre

Difficile de trouver plus « écologique » qu'une éolienne pendant son fonctionnement : pas d'émission de gaz, pas de particules. Même chose pour le sol : pas de déchets, pas d'effluents, aucun rejet, pas d'influence sur la qualité de l'air. L'énergie propre par excellence.

Si l'on ne souhaite pas remplacer une éolienne en fin de vie, on peut la retirer aussi discrètement qu'elle est arrivée et qu'elle a vécu : démontage et transport faciles, remise en état très rapide du site compte tenu de la faible emprise au sol. De plus, l'opérateur d'un parc éolien a obligation de constituer des réserves financières en cours d'exploitation afin de garantir la remise en état du site.

La nuisance sonore est souvent évoquée. Le bruit d'une éolienne moderne vient de la circulation du vent entre les pales et du passage de celles-ci devant le mât. En réduisant la vitesse de rotation à l'extrémité des pales, les technologies utilisées aujourd'hui

ont limité ce bruit, généralement couvert par celui du vent lui-même. Au niveau du rotor, il est proche de 100 dB ; au pied de l'éolienne, il s'élève à 55 dB ; à 500 mètres, la distance imposée en pratique par les DDASS entre l'éolienne et la première habitation, il est de 35 dB

– le niveau sonore d'une conversation à voix basse. Quant aux infrasons produits par les éoliennes, il a été scientifiquement prouvé qu'ils n'ont aucun impact sur la santé. ■

