



Description de la technologie

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité, grâce à la rotation d'un rotor entraîné par les pales. La productivité de l'éolienne dépend du diamètre du rotor et des conditions de vent (liées à la hauteur du mât, le vent étant plus fort en altitude qu'au niveau du sol, et à la présence éventuelle d'obstacles environnants).

Les modèles les plus répandus sont les éoliennes à axe horizontal à 3 pales, avec rotors à vitesse variable. On distingue trois grandes catégories d'éoliennes :

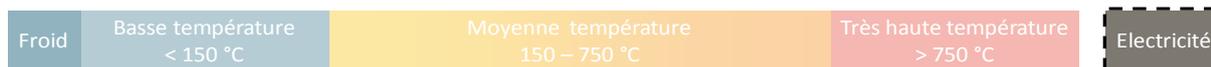
- Les grandes éoliennes : ce sont celles installées dans les parcs éoliens, elles développent une puissance d'environ 2 MW, ce qui correspond en moyenne en France à la consommation d'environ 2 000 foyers (hors chauffage). Le mât est en général deux fois plus haut que la longueur des pales : de l'ordre de 100 m pour des pales de 50 m pour les éoliennes installées actuellement.
- Les petites éoliennes : elles sont destinées aux sites non reliés au réseau électrique ou cherchant l'autoconsommation. Leur puissance est inférieure à 36 kW. Le mât mesure entre 10 et 35 m.
- Les éoliennes de puissance intermédiaire, ou moyen éolien. Elles sont reliées au réseau électrique, leur puissance est comprise entre 36 kW et 250 kW. La hauteur du mât est inférieure à 50 m.



Crédits : Parc Le Haut-Corlay (22), ADEME/J. Le Goff

Les éoliennes standards commencent à produire pour une vitesse de vent de l'ordre de 11 km/h. Pour des vents entre 11 km/h et 40 km/h, la puissance délivrée augmente avec la vitesse de vent, jusqu'à la puissance nominale de la machine. Au-delà de 40 km/h et jusqu'à 90 km/h, les éoliennes continuent à délivrer la puissance nominale. Au-delà de 90 km/h, elles sont arrêtées par souci de sécurité et de protection du matériel. Cependant, quel que soit le niveau de production, les éoliennes connectées au réseau électrique doivent maintenir une qualité constante du courant (en termes de fréquence, de tension, etc.).

Usages



Les éoliennes sont uniquement utilisées pour produire de l'électricité.

Secteurs d'utilisation par vecteur énergétique

Électricité

Tous secteurs

Illustration d'utilisation de la technologie

L'utilisation d'éoliennes en autoconsommation pour l'industrie, est aujourd'hui très peu répandue. Cependant, [une usine BMW en Allemagne alimente ses lignes de production de voitures électriques grâce à l'énergie produite par quatre éoliennes](#). Cette usine est précurseur dans son domaine et démontre la possibilité qui s'offre aux industriels d'autoconsommer de l'énergie éolienne.

Coûts

Éoliennes "standard"

CAPEX :

1 300 – 1 400 EUR/kW

OPEX :

42 – 52 EUR/MWh/an

Coût total de production :

53,9 – 108,1 EUR/MWh

Éoliennes nouvelle génération

CAPEX :

1 400 – 1 700 EUR/kW

OPEX :

42 – 52 EUR/MWh/an

Coût total de production :

50,4 – 93,8 EUR/MWh

La filière éolienne est encore très peu diffusée dans l'industrie en France, en particulier suivant des schémas d'autoconsommation. Il existe donc trop peu de données de coût pour présenter des coûts totaux de production spécifiques à l'industrie. Les chiffres donnés ci-dessous sont les coûts de la filière éolienne française tous secteurs confondus.

Il existe 3 catégories d'éoliennes, de tailles différentes. Les petites éoliennes (< 36 kW) et moyennes éoliennes (36 à 350 kW), qui pourraient être plus indiquées dans le cadre d'autoconsommation en industrie, mais qui ne sont aujourd'hui pas économiquement rentables dans la plupart des cas. Les coûts de production de l'éolien se concentrent ici sur ceux du grand éolien terrestre (de l'ordre de 2 MW).

Les vitesses de vent moyennes ne sont pas les mêmes partout en France et varient de façon très locale. Les zones présentant une vitesse moyenne au moyen très faible, classe de vents IV (< 6 m/s) ne permettent pas le développement de projets rentables. A partir de 6 m/s, vents faibles de classe III, les projets peuvent devenir intéressants grâce à l'utilisation de machines nouvelle génération, des éoliennes toilées, qui présentent des coûts d'investissement plus élevés mais de meilleures performances et une densité au sol plus faible. Les sites de classe II et I peuvent être équipés d'éoliennes standard, moins chères à l'achat mais présentant un nombre d'heures de fonctionnement à pleine puissance plus faible.

Diffusion de la technologie



L'éolien terrestre est une filière mature bien qu'elle soit encore très peu utilisée en autoconsommation dans l'industrie aujourd'hui.

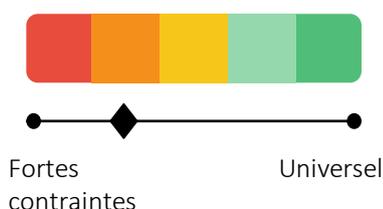
Le potentiel d'innovation reste cependant important sur l'ensemble de la chaîne de valeur des projets et notamment sur la conception des rotors et leur contrôle pour une productivité améliorée. [1]

Contraintes d'intégration sur site

L'installation d'éoliennes de puissance nominale 1 à 3 MW présente une densité au sol de l'ordre de 12 à 19 ha/MW (il faut une distance suffisante entre les machines, de manière à ce que les machines les plus au vent ne perturbent pas l'écoulement du vent pour les machines en aval).

Les éoliennes sont inscrites à la nomenclature des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

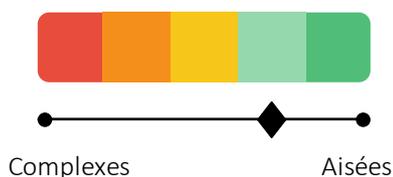
Ces contraintes réglementaires concernent : l'éloignement des routes et des habitations ; le respect des zones naturelles protégées, des sites classés, des couloirs migratoires, des couloirs aériens et zones radars, etc. Des schémas régionaux éoliens précisent les zones d'implantation favorables et les zones d'exclusion.



Les éoliennes de moins de 50 m de hauteur (hauteur nacelle) doivent faire une déclaration ICPE. Celles de plus de 50 m doivent obtenir une autorisation ICPE. Depuis le 1^{er} mars 2017, les différentes autorisations sont regroupées sous une unique autorisation environnementale, qui inclut les études d'impact sur l'environnement et le voisinage. [4]

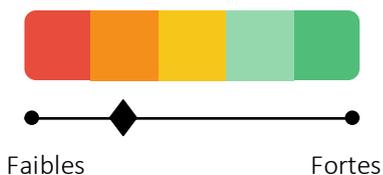
Les projets d'installation de parcs éoliens peuvent aussi se heurter à des sujets d'acceptation par les habitants, potentiellement complexe (impact paysager, pollution sonore, etc.) même en cas de conclusion favorable de l'étude d'impact. La multiplication du nombre de recours est un frein à la filière éolienne en France car elle a pour conséquence d'augmenter les coûts de production et d'allonger les temps de développement des projets. Cependant, l'autorisation environnementale parue récemment est supposée limiter les risques de recours et leurs conséquences sur les coûts de développement. [4]

Contraintes d'opération et de maintenance



Des entreprises spécialisées réalisent l'exploitation et la maintenance de parcs éoliens. Il existe en France une vingtaine d'entreprises spécialisées de ce type. Le taux de disponibilité technique des éoliennes se situe autour de 97 %, en ne tenant compte que des arrêts pour maintenance et non de la disponibilité de la ressource en vent. Aujourd'hui les éoliennes de nouvelles générations de plus en plus fiables permettent de réduire encore les besoins de maintenance. [2]

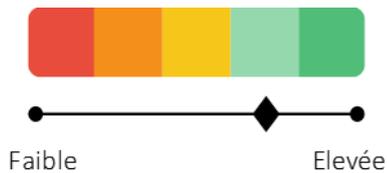
Disponibilité et accessibilité de la ressource



La ressource en vent est accessible sur tout le territoire avec des zones plus venteuses que d'autres (voir le Système d'Information Géographie Wind Atlas). Cependant, de fortes contraintes réglementaires environnementales et géographiques (obstacles au vent) limitent les zones éligibles.

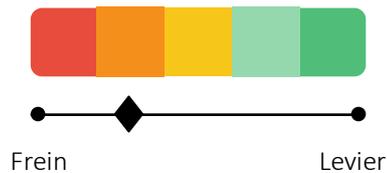
La ressource est variable et dépend des conditions météorologiques. Le facteur de charge des éoliennes est en moyenne de 23 % en France pour les éoliennes standard, il est plus élevé en mer (en dehors du scope de cette fiche) que sur terre. Le facteur de charge dépend du vent sur le site et de la productivité de la machine installée. [2]

Performance environnementale



L’empreinte carbone de ces systèmes est très faible, de l’ordre de 7 gCO₂eq/kWh, soit 75 gCO₂eq/kWh de moins que le mix électrique français. [3]

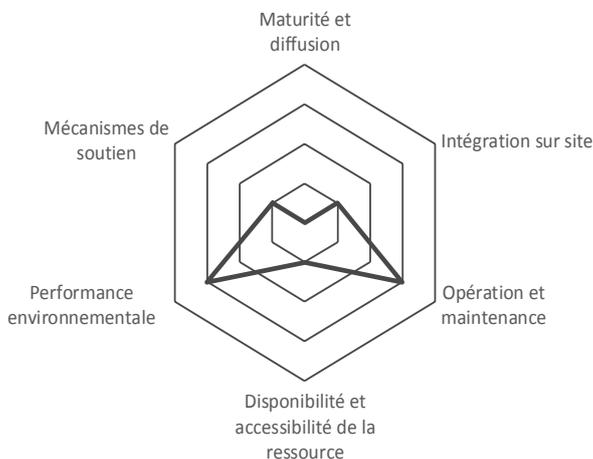
Mécanismes de soutien



En autoconsommation, le seul dispositif de soutien de la filière éolienne est l’appel d’offre de la Commission de régulation de l’énergie (CRE) dédié à l’autoconsommation. Cet appel d’offres concerne les installations de 100 kW à 500 kW et vise les secteurs industriels, tertiaires et agricoles qui présentent une plus grande corrélation entre les périodes de production et de consommation. Il est cependant plus favorable aux projets de solaire photovoltaïque, plus compétitifs. [4]

Les installations revendant tout ou une partie de l’électricité produite peuvent aussi bénéficier du dispositif de complément de rémunération qui est versé au producteur en plus du revenu de vente directe sur le marché de l’électricité. Ces projets peuvent aussi être éligibles à des appels d’offres de la CRE. Depuis 2017, le complément de rémunération a été révisé pour les installations de petites tailles (moins de 6 éoliennes) avec une durée des contrats allongée à 20 ans. Un système d’appels d’offres pluriannuels a aussi été mis en place pour les parcs de plus grande taille (plus de 6 éoliennes). [4]

En résumé



La filière éolienne terrestre est mature mais très peu développée dans l’industrie, et encore moins en autoconsommation, pour plusieurs raisons. Tout d’abord, l’espace et les distances aux bâtiments nécessaires pour installer une ou plusieurs éoliennes sont souvent incompatibles avec l’espace disponible sur un site industriel. De plus, les politiques de soutien à la filière ont jusqu’ici principalement visé l’injection d’électricité renouvelable sur le réseau et non l’autoconsommation. Le nouvel appel d’offre de la CRE concernant l’autoconsommation, lui, est beaucoup plus favorable aux projets solaires photovoltaïque qu’aux projets éoliens. Les éoliennes relevant du petit/moyen éolien (de puissance nominale de quelques dizaines de kW à quelques centaines de kW), soumises à moins de contraintes d’installation, n’ont pas encore trouvé de modèle d’affaires satisfaisant.

Dans cette fiche technologique, seule l’utilisation de l’électricité produite par les éoliennes en autoconsommation est considérée. La vente de cette électricité sur le réseau est aussi une alternative intéressante et jusqu’à aujourd’hui plus rentable car bénéficiant de meilleurs soutiens publics.

Sources

- [1] *Coûts des énergies renouvelables en France*, ADEME, 2016
- [2] *Les moyens de production d’énergie électriques et thermiques*, ENEA pour ADEME et Région Bretagne, 2014
- [3] Base carbone, ADEME
- [4] Ministère de la Transition écologique et solidaire, l’éolien terrestre, cadre réglementaire, Web, 2017
- [5] *Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie*, ADEME, 2017.

Intégration des énergies renouvelables et de récupération dans l'industrie

Fiche technique Éolien

Cette fiche décrit la technologie éolienne en identifiant les forces et faiblesses de cette technologie pour son intégration dans l'industrie : coûts de production de l'énergie, niveau de maturité et de diffusion, facilité d'intégration sur site, contraintes d'opérations et de maintenance, empreinte carbone.

Cette fiche permet de caractériser la technologie afin d'identifier les avantages qu'elle apporte, mais aussi les freins et difficultés à surmonter.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.



www.ademe.fr



010723 - F10