



L'énergie éolienne

Avril 2016

Contenu

Contenu	1
Enjeux.....	1
Description.....	2
Chiffres clés	2
Contexte international.....	2
L'électricité éolienne en France	3
Développement économique de la filière	3
Etat des connaissances	3
Atouts de l'éolien.....	3
Une source d'énergie propre et locale	3
Une source d'énergie prévisible et gérable	4
Une compétitivité croissante	4
Focus sur l'éolien en mer.....	5
Points d'attention	6
Contrôle des impacts acoustiques et paysagers	6
La préservation de la biodiversité	6
La gestion des interactions avec les radars	7
Une réglementation stabilisée et lisible	7
Perspectives d'évolution.....	7
Un secteur porteur d'innovations.....	7
Une opportunité de développement de l'économie circulaire.....	7
Favoriser l'éolien participatif et citoyen.....	8
Le Petit Eolien	8
Actions de l'ADEME	9
Avis de l'ADEME	10

Enjeux

Dans le cadre de ses engagements pour le climat, la France s'est fixé des objectifs ambitieux en matière d'énergies renouvelables (EnR). Ainsi, la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) prévoit que 40% de la production d'électricité se fera à partir d'EnR en 2030 (elle était de 18% en 2015).

Si l'hydraulique constitue aujourd'hui la principale source d'énergie renouvelable pour l'électricité en France (environ 12% de la production totale d'électricité), elle présente peu de possibilités d'accroissement de production. L'énergie éolienne offre, pour le système électrique français, un potentiel technique important et encore largement sous-exploité. L'objectif de production d'électricité éolienne est de 58 TWh en 2020, ce qui devrait représenter plus de 10% de la demande d'électricité. La Programmation Pluriannuelle de l'Energie fixe un objectif de puissance installée compris entre 21 800 MW et 26 000 MW d'éolien terrestre et 3 000 MW d'éolien en mer posé à horizon 2023, ce qui correspond, respectivement, à 9 000 à 10 500 machines sur terre et 440 machines en mer. L'éolien sera donc l'une des principales sources d'électricité renouvelable contributrices de la transition énergétique. Dans ses travaux de perspectives énergétiques pour 2030, l'ADEME attribue à l'éolien une part de 22% dans la production électrique nationale.

Description

Les éoliennes transforment l'énergie cinétique du vent en électricité. Un rotor composé de pales (généralement au nombre de trois) entraîne un générateur électrique ; l'ensemble est situé à une hauteur au sol définie par la hauteur du mât, ce qui permet de bénéficier d'un vent plus fort et moins turbulent qu'au niveau du sol.

L'éolienne est caractérisée par sa puissance nominale, qui est pour la majorité des modèles sa puissance maximale et la puissance du générateur électrique. Les puissances d'éoliennes se répartissent en trois catégories :

- les « grandes éoliennes », dont la puissance dépasse 250 kW¹. En France, la plupart des éoliennes terrestres que l'on installe aujourd'hui ont une puissance unitaire de 2 MW à 2,5 MW, pour un diamètre de rotor compris entre 70 m et 100 mètres. En mer, les éoliennes installées ont des puissances de 5 à 8 MW et des diamètres de rotor de 150 mètres à 180 mètres ;
- les éoliennes moyennes : de 36 kW à 250 kW ;
- le « petit éolien », de puissance inférieure à 36 kW et de diamètre de rotor inférieur à 15 mètres.

Le niveau de production d'électricité dépend de la vitesse du vent capté par le rotor de l'éolienne. Le facteur de charge, soit le rapport entre la puissance moyenne effectivement délivrée et la puissance nominale installée, est un indicateur de la performance des éoliennes (ou des parcs éoliens). Il dépend, outre des caractéristiques techniques des éoliennes, des conditions météorologiques (vitesse du vent, densité de l'air). En France, le facteur de charge constaté des éoliennes à terre est de 23 % sur les cinq dernières années². Les machines de nouvelle génération, caractérisées par des rotors de plus grand diamètre et des génératrices de puissance standard de 2 à 3 MW (parfois appelée éoliennes toilées) fonctionnent plus rapidement à pleine puissance, même pour des vents moyens à faible, ce qui leur permet d'atteindre des facteurs de charge moyens de 30% dans les mêmes conditions de vent. Les éoliennes en mer ont un fonctionnement similaire à celui des éoliennes terrestres mais elles bénéficient généralement de vents plus puissants et plus réguliers, et donc d'un facteur de charge plus élevé (de l'ordre de 40%).

¹ Ce qui correspond, sur le réseau de distribution d'électricité, au passage entre réseau à basse tension BTA pour installations de petite puissance et réseau à haute tension HTA.

² Source : définition du facteur de charge et chiffre de 23%, d'après RTE, Bilan prévisionnel 2015.

Chiffres clés

Contexte international

Selon les données de l'Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), la **puissance éolienne installée dans le monde** au cours de l'année 2015 a atteint 60 000 MW (estimation provisoire), pour une capacité totale en fonctionnement à fin 2015 de 431 000 MW. Depuis 4 ans, les nouvelles installations dépassent 50 000 MW par an. L'Asie constitue le premier marché mondial, en particulier du fait de la Chine (+27 000 MW en 2014, soit une capacité de 146 000 MW en fin 2014, et une estimation de +28 000 MW en 2015). Les Etats-Unis et l'Allemagne montrent un dynamisme important en termes d'installations (estimées respectivement à +8 500 MW et +5 800 MW en 2015, soit des capacités respectives de 74 500 MW et 44 800 MW en fin 2015). Le marché de l'Union Européenne est stable avec de l'ordre de 12 000 MW installés en 2015 pour une capacité installée à fin 2015 de 144 000 MW.

L'Europe a été un précurseur du développement éolien : éolien terrestre dans les années 1990 (même si les Etats-Unis commençaient à installer des éoliennes dès les années 1980), puis éolien en mer dans les années 2000 (après une première installation dès 1991). En conséquence, les constructeurs européens conservent des parts de marché importantes au niveau mondial, même si la dynamique bascule actuellement vers les constructeurs chinois. Les pays européens leaders, en termes de production et de développement industriel, sont le Danemark, l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni, qui ont lancé des programmes éoliens et des mécanismes de soutien dans les années 1990.

Pays	Taux de pénétration de l'éolien en 2015 dans les pays historiquement très engagés dans son développement (production éolienne annuelle rapportée à la consommation électrique annuelle dans le pays)
Allemagne	13%
Espagne	20%
Danemark	42%
Royaume-Uni	11%
dont Ecosse	97%

6 premiers fabricants d'éolienne	Pays de maison mère	Part de marché en 2014
Vestas	Danemark	~ 11%
Siemens	Allemagne	~ 11%
Golwind	Chine	9%
Enercon	Allemagne	7%
United Power	Chine	5%
Gamesa	Espagne	4,5%

Source : Make Consulting, Navigant Consulting, 2015

L'électricité éolienne en France

2016 marque les 20 ans du lancement du programme français de l'éolien ! Lancé le 9 février 1996, le programme EOLE 2005 devait mener le parc éolien français à une capacité comprise entre 250 et 500 MW à l'horizon 2005. Fin 2005 la puissance installée était d'un peu plus de 757 MW et la barre du TWh de production éolienne avait été franchie pour la première fois

A fin 2015, la puissance totale raccordée au réseau français est de l'ordre de 10 300 MW³. Après quelques années de croissance (essentiellement 2005-2010), la puissance éolienne terrestre installée annuellement a connu une forte baisse entre 2011 et 2013, années durant lesquelles en moyenne 750 MW ont été raccordés par an, contre 1 200 MW en 2010. L'année 2014 semble marquer le début d'une nouvelle phase dynamique : les installations annuelles sont repassées au-dessus des 1 000 MW. Ce rebond a permis à la France de revenir à la quatrième place sur le marché annuel européen, derrière l'Allemagne (5 300 MW installés en 2014), le Royaume Uni (1 700 MW, dont 1 400 MW en mer) et la Suède (1 050 MW). L'investissement moyen est stable, de l'ordre de 1,3 M€ par MW installé⁴.

La **production électrique** du parc éolien français s'est élevée à 21 TWh en 2015³, soit 4,5% de la consommation nationale et 24% de la production issue d'énergies renouvelables. Sur les heures les plus productives, l'éolien a couvert jusqu'à 16% de la consommation nationale d'électricité. On observe une saisonnalité de la production, avec un facteur de charge mensuel moyen typiquement supérieur à 30% durant les mois d'hiver et de l'ordre de 12% à 15% les mois d'été. La production plus importante de l'éolien en hiver qu'en été suit le profil saisonnier de consommation d'énergie. Ainsi, même lors des dernières périodes de forte consommation électrique (vagues de froid de 2011, 2012 et 2013, aux heures de pointe à 19h), l'éolien a pleinement contribué à l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité, avec des facteurs de charge moyens constatés de 24 à 25%⁵. La moyenne annuelle reste stable à 23%.

En Europe, la part de l'éolien dans la production d'électricité est en majorité plus élevée qu'en France, représentant en moyenne 10% de la production électrique.

Développement économique de la filière

Même si à ce jour 60% de la valeur des éoliennes sont encore importés, la fabrication des composants et l'installation des machines emploient directement plus de

10 000 personnes en France. Les emplois liés à l'exploitation des parcs sont en croissance continue. Les emplois liés aux études et installations subissent, toutefois, de fortes variations, liées aux accélérations et décélérations dans le développement de la filière dues notamment aux évolutions du contexte réglementaire.

La filière éolienne française se compose de 250 entreprises de tailles et de secteurs d'activité très divers qui font elles-mêmes appel à 150 sous-traitants. Les clusters régionaux et des initiatives comme la [plateforme Windustry](#), qui accompagne les entreprises souhaitant se diversifier dans l'éolien ainsi que la filière industrielle française de l'éolien à l'export, concourent à structurer la filière. Les exportations françaises de composants destinés soit aux fabricants étrangers d'éoliennes (génératrices, couronnes d'orientation), soit à l'installation de parcs à l'étranger (câbles, etc.) sont estimées entre 900 millions à 1 milliard d'euros par an. Cependant, les fabricants français peinent encore à rattraper leur retard par rapport à leurs homologues danois, allemands ou espagnol.

Etat des connaissances

La volonté nationale de développement de l'éolien se fonde sur de bonnes performances non seulement environnementales, mais aussi techniques et économiques. Un déploiement équilibré permettra d'exploiter au mieux les performances de l'éolien, tout en maîtrisant les enjeux qui font l'objet de points d'attention.

Atouts de l'éolien

Une source d'énergie propre et locale

La production d'électricité d'origine éolienne est caractérisée par un très faible taux d'émission de CO₂ : 12,7 gCO₂/kWh pour le parc installé en France⁶. Ces émissions indirectes, liées à l'ensemble du cycle de vie d'une éolienne, sont faibles par rapport au taux d'émission moyen du mix français qui est de 82 gCO₂/kWh⁷. D'autre part, la production éolienne permet d'éviter le recours aux centrales thermiques à combustibles fossiles et contribue ainsi à diminuer les émissions de CO₂ directes pour la production d'électricité⁸.

³ RTE « Bilan électrique 2015 ».

⁴ Etude ADEME : Marchés, emplois et enjeux énergétiques des activités liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables, édition 2015.

⁵ Source : RTE, Bilans Prévisionnels de l'équilibre offre/demande 2011 à 2015.

⁶ Etude ADEME : « Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France », 2016.

⁷ Source : Base Impacts®, année de référence 2011.

⁸ On observe depuis 2008 une tendance globale à la baisse du taux d'émission de CO₂/kWh, qui reflète l'évolution du mix électrique français : augmentation de la part d'EnR, diminution

L'éolien présente également l'un des **temps de retour énergétique** parmi les plus courts de tous les moyens de production électrique⁹: les calculs sur le parc français montrent que l'énergie nécessaire à la construction, l'installation et le démantèlement futur d'une éolienne est compensée par sa production d'électricité en 12 mois⁶. En d'autres termes, sur une durée de vie de 20 ans, une éolienne produit 19 fois plus d'énergie qu'elle n'en nécessite pour sa construction, son exploitation et son démantèlement.

Enfin, l'exploitation d'une éolienne ne génère pas directement de déchets ni de pollution de l'air et ne nécessite pas de prélèvement ni de consommation d'eau. L'énergie éolienne contribue donc efficacement aux objectifs énergie-climat et à l'indépendance énergétique du pays, car elle injecte sur le réseau une énergie produite localement, sans importation de combustible.

Une source d'énergie prévisible et gérable

Pour pouvoir utiliser efficacement l'énergie éolienne et l'intégrer au système électrique, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE) a besoin de prévoir à court terme sa production. Même si le vent local peut être difficile à prévoir, l'expérience du gestionnaire de réseau montre qu'à l'échelle régionale se produit un effet de lissage des variabilités de la production, appelé foisonnement. Le foisonnement permet de prévoir la production avec une précision suffisante pour assurer une bonne gestion par RTE de l'équilibre entre l'offre (la production par l'ensemble du mix électrique) et la demande (la consommation) électrique¹⁰. De plus, d'après les données mises à disposition par RTE¹¹ pour l'éolien, l'erreur de prévision de la veille pour le lendemain restera inférieure, au moins jusqu'à 2020, à l'erreur de prévision de la demande d'électricité. Ainsi, étant donné le bouquet énergétique français et les capacités de prévision actuelles, l'introduction de la production éolienne **ne nécessite pas de centrales thermiques de réserve supplémentaires**. RTE estime d'ores et déjà que

des centrales thermiques. Sur le marché de l'électricité, l'injection d'électricité éolienne (prioritaire) se fait au détriment des moyens de production les plus chers, et se substitue donc majoritairement aux centrales à combustible fossile. Pour comparaison, la production des centrales à charbon représente moins de la moitié de la production électrique de l'éolien en France, mais est responsable de 36% des émissions directes de CO₂ du secteur électrique en France (d'après RTE, Bilan électrique 2015).

⁹ Source : Rapport GIEC « Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation », 2011.

¹⁰ RTE dispose de 8 centres de commande et a mis en place la plateforme IPES pour prévoir la production des parcs éoliens et photovoltaïques.

¹¹ Site internet du service eco2mix du RTE : <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>.

l'amélioration des moyens de prévision permettra de gérer un parc éolien de 20 000 MW¹². Au-delà, le développement de nouvelles solutions de gestion (à travers des réseaux intelligents ou « smart grids »), favorisant notamment l'effacement des consommations aux heures de pointe, pourra apporter de la flexibilité pour la conduite du système électrique et permettre d'accompagner le développement de l'éolien en particulier et des EnR en général.

Une compétitivité croissante

Le soutien au développement de l'éolien, indispensable dans un premier temps pour porter une filière à maturité économique, se fait en France par l'achat de l'électricité produite. Le tarif d'achat de l'électricité d'origine éolienne est fixé par arrêté. Pour **l'éolien terrestre**, il est de l'ordre de 85 €/MWh¹³ pendant 10 ans, puis varie entre 32 et 85 €/MWh pendant 5 ans selon les sites. Le prix d'achat moyen de l'électricité sur la durée de vie d'une éolienne est donc de l'ordre de 70 €/MWh. Pour les nouvelles installations de production d'électricité, toutes technologies confondues, l'éolien terrestre en France présente les coûts de production (coûts complets) les plus faibles. Dans les prochaines années, les machines de nouvelle génération permettront d'améliorer la productivité et de diminuer le coût de production de l'électricité. Par exemple, sur un même gisement de vent permettant de produire de l'électricité à un coût moyen sur 20 ans de 70 €/MWh avec les machines actuelles, les éoliennes de nouvelle génération permettront de diminuer ce coût autour de 60 €/MWh.

La stimulation de l'investissement dans les capacités de production éoliennes a nécessité un mécanisme incitatif : le tarif d'achat, qui permet à l'éolien de s'insérer dans un marché existant et largement constitué d'équipements déjà amortis. Le financement de la différence entre le tarif d'achat et le prix de gros de l'électricité est à la charge des consommateurs, via la Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE). La CSPE couvre différentes charges¹⁴ ; en 2015 la part de

¹² Contribution RTE au [débat public sur le parc éolien des Deux Côtes](#).

¹³ Valeur estimée pour un parc connecté en 2014. Les valeurs de référence sont données par l'arrêté de 2006, confirmé par la Commission européenne en 2014 (82 €/MWh pendant les 10 premières années, puis entre 28 €/MWh et 82 €/MWh pendant les 5 années suivantes). Suivant la date de construction du projet, ces valeurs sont actualisées sur la base des indices de coût du travail et prix de production de l'industrie. Le tarif applicable aux contrats d'achats postérieurs à 2006 est actualisé tous les ans en fonction de l'évolution d'un indice des coûts horaires du travail et d'un indice des prix à la production entre 2006 et la date de demande du contrat d'achat.

¹⁴ Notamment la péréquation tarifaire et le soutien aux EnR.

l'éolien dans la CSPE est estimée à 15,2%, soit 0,27 c€ par kWh consommé. L'évolution à court terme de la part de l'éolien dans la CSPE dépend essentiellement de deux facteurs : i) du niveau de prix sur le marché de l'électricité ; ii) de la puissance installée du parc éolien français. Etant donné la structure du tarif d'achat (10+5 ans) et une hypothèse d'installations annuelles entre 1 000 MW et 1 300 MW, la CSPE de l'éolien est actuellement à une inflexion et devrait se stabiliser à horizon 2020, voire avant 2020 si le prix moyen de marché augmente. A moyen et long termes, l'augmentation de la productivité des parcs grâce à la baisse des coûts permise par les nouvelles machines devrait également contribuer à réduire la part de l'éolien dans la CSPE. On peut également noter que la LTECV prévoit de modifier le système de soutien aux énergies renouvelables. A terme, la production d'électricité éolienne sera vendue sur le marché de gros de l'électricité et pourra bénéficier d'un complément de rémunération.

Par ailleurs, le coût de production d'énergie éolienne est par nature plus stable que celui des sources d'électricité conventionnelles, puisqu'il ne dépend pas de la volatilité du cours des combustibles. Cependant, cette stabilité fait actuellement face à des prix de marché de gros de l'électricité à des niveaux historiquement bas, qui reflètent les disponibilités à court terme mais posent des problèmes généraux pour l'adéquation des capacités à long terme. L'enjeu de la transition énergétique réside donc aussi, au niveau européen, dans l'organisation des conditions d'accès au marché de l'électricité et dans la fixation des prix à un niveau compatible avec l'amortissement des installations.

Focus sur l'éolien en mer

Les parcs actuels d'éolien en mer en Europe du Nord produisent une électricité entre 50% et 100% plus chère que celle issue de l'éolien terrestre, suivant l'éloignement à la côte, la profondeur des eaux, la vitesse des vents. L'éolien en mer apporte toutefois un volume et une régularité de production supérieurs et génère moins de conflits liés à l'impact paysager. C'est une filière en développement, dont les coûts sont amenés à baisser plus fortement que l'éolien terrestre, qui a pleinement sa place dans le bouquet énergétique et sur laquelle des entreprises françaises (Alstom-GE, Adwen) sont des nouveaux acteurs entrants sur le marché mondial¹⁵.

En 2011 et 2013, l'Etat a lancé deux appels d'offres nationaux, pour une capacité totale d'environ 3 000 MW. Les montants du prix de l'électricité pour ces parcs en mer sont d'environ 200 €/MWh¹⁶, ce qui est plus élevé que les parcs situés en Europe du Nord. Si les conditions d'implantation sont différentes (éloignement, profondeur, type de fondation), ce niveau inclut également les investissements et les risques associés au développement d'une filière industrielle. A moyen terme, la diminution du prix de l'électricité de l'éolien en mer devrait être de l'ordre de 40 à 50%. L'implantation industrielle de ces projets pourrait permettre la création d'ici 2020 d'une dizaine de milliers d'emplois, dont une grande partie en créations nettes, et permettre de poser les fondations d'une filière exportatrice.

Les parcs les plus avancés (Fécamp, Courseulles-sur-Mer) ont obtenu un rapport favorable de l'enquête publique et attendent l'autorisation de construction ; l'enquête publique du parc au large de Saint Nazaire s'est tenue en 2015. Pour la deuxième moitié des parcs (Saint Briec, Le Tréport, Noirmoutier-Yeu), l'enquête publique constitue la prochaine étape du développement des projets.

¹⁵ Voir aussi la [fiche technique sur l'éolien en mer](#).

¹⁶ Source : Rapport de la Commission de Régulation de l'Énergie sur « La contribution au service public de l'électricité », 2014.

Points d'attention

Le bon développement de la filière éolienne repose sur la prise en compte des caractéristiques environnementales des territoires. La réglementation relative aux projets éoliens permet d'ores et déjà de tenir compte des impacts potentiels des projets.

Contrôle des impacts acoustiques et paysagers

Si depuis de nombreuses années, les $\frac{3}{4}$ des Français se disent favorables au développement de l'éolien, des freins demeurent lorsqu'il s'agit d'implanter des éoliennes proches de leur lieu de vie. Ainsi, un tiers d'entre eux sont opposés à l'installation d'éoliennes à moins d'un km de leur résidence. Ces derniers mettent en avant la crainte du bruit des machines et jugent que celles-ci ne sont pas esthétiques et nuisent au paysage¹⁷.

Les enjeux acoustiques et paysagers sont pris en compte dans l'encadrement réglementaire de l'éolien: distance minimale de 500 m entre les éoliennes et les habitations, et valeurs limites sur le bruit ajouté par les éoliennes à l'ambiance sonore habituelle qui peuvent conduire les développeurs à brider la vitesse de rotation des éoliennes. Une étude réalisée par l'Afsset¹⁸ en 2008 conclut que la réglementation sur le bruit est adaptée et que le développement de l'éolien n'engendre pas de problèmes sanitaires. Actuellement, à 500 m de distance, la perception acoustique d'une éolienne correspond à celle des bruits intérieurs d'un appartement tranquille dans un quartier calme. Depuis que les premières machines ont été installées en France, la R&D portée par les fabricants et les développeurs a d'ailleurs permis de diminuer le bruit aérodynamique des pales ou celui des machines électriques, d'améliorer les logiciels de simulation sonore et d'optimiser le bridage en cas de dépassement des plafonds d'émission sonore. La question particulière des infrasons a fait l'objet d'études spécifiques. Il apparaît que le niveau d'infrasons émis par les éoliennes n'est pas significativement différent de celui de situations rencontrées communément en environnement urbain ou rural¹⁹ et n'appelle pas d'adaptation de la réglementation.

Les impacts visuels des parcs éoliens sont souvent des facteurs de rejet d'une partie de la population. L'étude d'impact qui accompagne tout projet éolien inclut une **analyse paysagère de l'existant et la proposition d'un projet paysager** pour assimiler les spécificités du

territoire. [Un sondage réalisé en mars 2015](#)²⁰ indique que 71% des habitants de communes situées à moins d'un kilomètre d'un parc éolien estiment que les éoliennes sont bien implantées dans le paysage.

Enfin, en ce qui concerne l'usage des sols, l'éolien a l'avantage de ne pas entrer en concurrence avec d'autres activités, comme l'agriculture et l'élevage. En effet les surfaces réservées et qui ne permettent pas d'autre usage des sols se limitent aux fondations et aux aires de servitude (chemin d'accès...); pour une capacité installée de 19 000 MW en 2020, ces surfaces représenteraient seulement 0,004 % de la surface agricole utile de la France.

La préservation de la biodiversité

Les projets éoliens doivent maîtriser les impacts environnementaux et respecter les objectifs de la stratégie nationale pour la biodiversité²¹. A cet égard, en partenariat avec la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) et les professionnels de l'éolien, l'ADEME travaille depuis plus de 10 ans sur l'intégration environnementale des parcs éoliens français et l'évaluation des impacts, notamment vis-à-vis des oiseaux et chauve-souris, sur terre et en mer. Les observations montrent que le taux de mortalité aviaire varie en fonction du lieu et de la configuration du parc mais est moindre que les taux relevés autour d'autres installations comme les routes et les réseaux électriques²². Il est plus difficile de faire des comparaisons avec l'impact sur la biodiversité d'autres sources d'électricité, notamment les centrales thermiques, car celles-ci contribuent à la perte de biodiversité de façon plus complexe: changement climatique induit, exploitation des mines, effluents toxiques dans le sol et impacts sur l'eau.

L'impact relatif des éoliennes sur la biodiversité est donc faible mais doit néanmoins être pris en compte lors de la réalisation de l'étude d'impact afin de l'éviter au maximum, le réduire voire le compenser. C'est pourquoi un travail d'intégration environnementale est déjà effectué par les parties prenantes lors de l'élaboration des projets. Pour certaines espèces, en particulier les chauves-souris, des techniques sont en développement pour piloter le fonctionnement de l'éolienne durant les périodes d'activités de ces espèces; les premiers résultats montrent une forte réduction de la mortalité,

¹⁷ Etude ADEME « Les Français et l'environnement », décembre 2014.

¹⁸ « Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes. État des lieux de la filière éolienne. Propositions pour la mise en œuvre de la procédure d'implantation ». Avis de l'AFSSET, mars 2008.

¹⁹ Rapport de Resonate Acoustics pour l'Autorité Australienne de Protection de l'Environnement (EPA Australia), « Infrasound levels near windfarms and in other environments », 2013.

²⁰ Source : sondage CSA pour la France Energie Eolienne, réalisé en mars 2015 auprès de 500 personnes représentatives de la population française habitant dans une commune située à moins de 1 000 mètres d'un parc éolien.

²¹ [Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens](#) – MEDDE.

²² <http://www.eolien-biodiversite.com/>

pour une diminution négligeable de la production d'électricité²³.

Cette mise en cohérence des programmes éolien et biodiversité s'appuie sur l'ensemble des parties prenantes (professionnels, associations des milieux naturels, services de l'Etat) et se vérifie aussi bien sur terre qu'en mer.

La gestion des interactions avec les radars

Dans certaines conditions, les éoliennes peuvent ponctuellement générer des interférences avec les radars d'observation (militaires, météorologiques, aviation civile). Afin de garantir l'intégrité des missions de service public, des distances d'éloignement réglementaires entre éoliennes et radars ont donc été mises en place²⁴. En parallèle, des techniques se développent dans le but de diminuer les contraintes d'installation des éoliennes; par exemple le développement de pales à signature radar réduite, la mise au point de systèmes de filtrage du signal radar ou la simulation des interactions entre éoliennes et radar²⁵ pour mieux optimiser leur implantation. L'occupation d'une partie du territoire doit également être compatible avec les couloirs aériens pour l'aviation civile et les zones d'entraînement de l'armée de l'Air. Ces espaces sont pris en compte dans les planifications régionales, ils peuvent néanmoins faire l'objet de redéfinitions permettant un meilleur équilibre des usages.

Une réglementation stabilisée et lisible

Un cadre réglementaire est évidemment indispensable pour maîtriser les impacts sociétaux et environnementaux, favoriser la transparence et la concertation sur les projets. Depuis 2003, il a subi, en France, une modification tous les 2 ans en moyenne ; il s'est notablement complexifié entre 2008 et 2012. Ces nombreux changements ont abouti à un manque de visibilité pour les porteurs de projets, pénalisant le développement de la filière en France. Depuis 2012, la réglementation s'est stabilisée et s'est simplifiée. Ainsi en 2013, les Zones de Développement de l'Eolien (ZDE) ainsi que la règle des 5 mâts pour bénéficier du tarif d'achat ont été supprimées²⁶, ce qui permet une meilleure lisibilité et articulation des procédures. Une expérimentation pour regrouper le traitement des autorisations (dite autorisation unique) a été lancée en 2014 dans 7 régions ; la LTECV a étendu la procédure à toutes les régions. L'autorisation unique reste

²³ Voir le dispositif Chirotech sur le portail : <http://www.eolien-biodiversite.com>

²⁴ Décret de 1997 et arrêté de 2011.

²⁵ Depuis 2014, les développeurs peuvent utiliser un logiciel qui doit être validé par Météo France pour simuler les impacts radar des éoliennes.

²⁶ Loi n° 2013-312 visant à préparer la transition vers un système énergétique sobre et portant diverses dispositions sur la tarification de l'eau et sur les éoliennes.

un premier levier, qui doit néanmoins s'appuyer sur une simplification de fond et une visibilité accrue de la part de l'ensemble des parties prenantes.

Alors qu'en 2012, le délai théorique minimal de mise en service d'un parc éolien pouvait aller jusqu'à 7 ans en France (contre 4,5 ans en moyenne dans le reste de l'Europe²⁷), ces diverses mesures de simplification devraient permettre de diminuer les délais tout en gardant un encadrement réglementaire exigeant.

Par ailleurs, les exploitants sont tenus de constituer *ab initio* des garanties financières afin de couvrir les coûts de démantèlement des installations et de remise en état du site, contrainte à laquelle d'autres modes de production d'électricité ne sont pas soumis.

Perspectives d'évolution

Un secteur porteur d'innovations

Le déploiement du parc et les retours d'expérience des pays pionniers permettent une amélioration continue (systèmes de contrôle, maintenance, etc.). Par ailleurs, des ruptures technologiques sont attendues, en particulier dans les domaines de la cohabitation avec les radars, des structures mécaniques et de l'écoconception. L'éolien est donc un secteur de fortes innovations, qui devraient se traduire non pas tant par une augmentation de la puissance unitaire des éoliennes, que par une augmentation de leur facteur de charge et de leur productivité.

Une opportunité de développement de l'économie circulaire

Etant donné le caractère récent du parc éolien français, les volumes de matériaux à recycler ne devraient être significatifs qu'à compter de 2025. Mais l'éolien constitue dès aujourd'hui une opportunité de développement de l'économie circulaire, à la fois sur l'utilisation des matières premières et sur la localisation des bénéfices socio-économiques.

Même si à ce jour, le nombre d'éoliennes en fin de vie est encore très faible, leur taux de recyclabilité est élevé et la filière se prête bien à l'écoconception. En effet les éoliennes sont constituées essentiellement d'acier, de fonte, de béton et de matériaux composites. Ces 3 premiers matériaux sont facilement recyclables ; les composites, utilisés en particulier pour la fabrication des pales, constituent un axe de travail important à la fois pour l'allègement, la tenue à la fatigue, et la valorisation et le recyclage en fin de vie.

²⁷ Source : Syndicat des Energies Renouvelables, Livre blanc 2011.

La problématique de l'exploitation par l'industrie éolienne des « terres rares », souvent citées comme éléments de constitution des aimants permanents des génératrices électriques, doit être nuancée. Le néodyme et le dysprosium sont les deux éléments entrant dans la composition des aimants permanents ; ils correspondent à des ressources géostratégiques et posent globalement des problèmes d'impacts environnementaux, notamment pour leur extraction. Cependant, le parc éolien terrestre français est peu consommateur d'aimants permanents : seuls 3% de la capacité installée y a recours. Le parc éolien en mer, qui doit se développer dans les années à venir, a choisi l'option des génératrices à aimants permanents, et consommera environ 58 kg de néodyme et 5 kg de dysprosium par MW installé. La question des terres rares n'apparaît donc pas critique mais conduit à un autre axe de travail centré sur leur recyclabilité et sur le développement de solutions alternatives.

Concernant la dimension socio-économique et territoriale de l'éolien, il existe un grand potentiel d'optimisation des flux logistiques et de service, par le rapatriement de valeur ajoutée à différents niveaux (constructeur, fabrication de tours, maintenance de 2^{ème} niveau, synergies entre éolien terrestre et éolien en mer).

Favoriser l'éolien participatif et citoyen

Dans un contexte national qui fait de la transition énergétique un des enjeux forts des années à venir, l'implication des citoyens et des collectivités dans des projets de parcs éoliens présente de nombreux atouts. Leviers de financement de la production d'énergie renouvelable, les projets éoliens participatifs et/ou citoyens concourent à un meilleur ancrage dans les territoires, en participant au développement local et en entraînant les populations à s'intéresser à la question énergétique. La déclinaison opérationnelle de la LTECV devrait marquer une étape importante dans la multiplication coordonnée de ces projets en France. En pratique, l'ADEME identifie pour le moment deux principales formes de participation citoyenne et publique (qui ne sont pas exclusives l'une de l'autre) :

- Implication dans la gouvernance, se matérialisant par un investissement financier dans le capital des sociétés de projet. C'est le cas de l'investissement via un fonds d'entrepreneuriat social comme Energie Partagée Investissement ;
- Participation sans gouvernance, dans le cas où le soutien prend la forme d'un prêt accordé par les particuliers ou collectivités au porteur de projet. Cette participation regroupe notamment les plateformes de *crowdfunding* (par exemple : Lumo, Enerfip, Lendosphère, Greenchannel)

Ces formes de participation citoyenne et publique sont encadrées par le Règlement général de l'Autorité des Marchés Financiers, l'ordonnance du 30 mai 2014 sur le financement participatif et le décret du 16 septembre 2014 sur le financement participatif. Les dispositions votées dans la LTECV devraient également faciliter la mise en place de l'éolien participatif.

Le Petit Eolien

Parmi les machines de puissance nominale inférieure à 250 kW, on distingue le « micro-éolien » (machines < 1 kW), le « petit éolien » (machines entre 1 et 36 kW) et le « moyen » éolien (machines entre 36 et 250 kW).

En France, le marché compte plusieurs fabricants qui font notamment face à une forte concurrence étrangère.

Dans les conditions techniques et économiques actuelles, le petit éolien ne se justifie généralement pas en milieu urbain. Outre le fait que les éoliennes accrochées au pignon d'une habitation peuvent mettre en danger la stabilité du bâtiment, le vent est, en milieu urbain et péri-urbain, en général trop faible ou trop turbulent pour une exploitation rentable.

En 2016, le petit éolien ne bénéficie plus de crédit d'impôt, ni de tarif d'achat spécifique.

Toutefois, même si le potentiel énergétique global reste limité, le petit éolien peut répondre à une demande dans le milieu rural ou en zones non connectées au réseau, en particulier en autoconsommation dans les exploitations agricoles. La ressource en vent y est souvent accessible. En outre, les machines utilisées dans ce cas offrent souvent de meilleures performances techniques et économiques que celles destinées au marché des particuliers. Ainsi, une éolienne de 10 kW avec un facteur de charge de 17 % a une production du même ordre de grandeur que les consommations des exploitations agricoles. En autoconsommation, la production éolienne peut se coupler à des systèmes à inertie présents sur l'exploitation agricole (inertie thermique liée à un système de production de froid ou de chaleur, méthaniseur) qui amortissent la variabilité de la production éolienne. Enfin, pour un agriculteur, la production éolienne permet de couvrir un risque, en stabilisant une partie de sa facture d'énergie.

De même que pour les éoliennes de forte puissance, l'installation et l'utilisation des petites éoliennes doivent respecter certaines règles. Il est notamment nécessaire de bien connaître la ressource (estimation quantitative du vent et des turbulences), ainsi que la fiabilité et les



caractéristiques techniques des machines²⁸, et les conditions dans lesquelles la production pourra être utilisée (utilisation ou non de batteries, consommation flexible, etc....).

Pour entreprendre un projet de petit éolien avec une démarche qualité, il est indispensable de se rapprocher de professionnels reconnus, par exemple via l'Association Française des Professionnels du Petit Eolien.

Actions de l'ADEME

Les actions de l'ADEME visent à lever les freins au déploiement de l'éolien, en travaillant notamment sur la concertation, la limitation des impacts environnementaux ou la baisse des coûts. Elles portent sur trois volets :

- **l'acceptabilité et l'appropriation des projets** : depuis plus de 15 ans, l'ADEME a construit des formations techniques, destinées aux professionnels de l'éolien, pour étudier en détail les bonnes pratiques adaptées au montage d'un parc éolien en France, dans le respect des dispositions réglementaires. L'ADEME a également mené et soutenu des travaux sur la concertation autour des projets éoliens, notamment à travers l'édition d'un guide et l'organisation de formations. De plus, afin de diversifier les modèles de développement et d'appropriation sociétale, l'ADEME accompagne des projets d'initiative locale (portés par des acteurs publics, des groupements citoyens) à travers le financement d'études de faisabilité ou la mise au point d'outils juridiques ou financiers. L'ADEME soutient différents réseaux dédiés à l'éolien participatif, qui mettent en contact les acteurs des parcs éoliens et leur fournissent des informations, des conseils et une assistance²⁹. L'ADEME a aussi contribué à la mise en place du fonds d'investissement « [Energie partagée Investissement](#) ».

- **le soutien aux avancées technologiques** : dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir, l'ADEME a lancé plusieurs appels à projets sur l'éolien en mer (notamment sur les éoliennes flottantes) et sur le grand éolien. Les projets retenus ont pour objectifs globaux d'améliorer l'articulation R&D-industrie et donc d'accroître la compétitivité de la filière et de diminuer les coûts de production³⁰.

²⁸ Le portail internet du Site Expérimental pour le Petit Eolien National (SEPEN) met à disposition les fiches techniques des machines qu'il teste: <http://www.sepen.fr/>

²⁹ Réseau Taranis en Bretagne ; Energies citoyennes en Pays de la Loire ; RhôneAlpEnergie Environnement ; Energie Citoyenne Languedoc-Roussillon

³⁰ Les projets retenus comprennent des développements de composants, de machines complètes, de procédés de fabrication ou des conceptions de navires pour les parcs éoliens en mer. Les fiches des projets lauréats sont disponibles sur le site :

- la **recherche et développement** : les principales actions portent sur la prévision et la prédictibilité (outils, logiciels, méthodologies), la compatibilité des parcs éoliens et des radars utilisés pour la météorologie, la Défense ou l'aviation civile, et les impacts sur la biodiversité.

POUR EN SAVOIR PLUS

Publications

[Guide pratique ADEME « L'énergie éolienne »](#), 2015

[Guide ADEME-AMORCE « L'élu et l'éolien »](#), 2015

[Feuille de route stratégique ADEME sur le grand éolien](#), 2012

[Guide ADEME « La concertation en environnement »](#), 2011

Site Internet

<http://www.eolien-biodiversite.com> :

portail

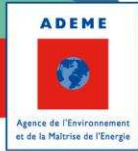
internet

ADEME/MEDDE/LPO

Statistiques et suivi en temps réel des productions

<http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>

<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-climat/966.html>



Avis de l'ADEME

L'énergie éolienne participe à l'équilibre offre-demande du système électrique national et contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'éolien terrestre est déjà proche de la compétitivité économique. Les évolutions à venir du système de soutien devront permettre aux évolutions technologiques de trouver leur place, en particulier les éoliennes de nouvelle génération qui permettront une production à plus faible coût et amélioreront les conditions d'intégration de l'électricité éolienne sur le réseau.

La filière éolienne dans son ensemble est créatrice de valeur ajoutée, d'emplois locaux et d'innovations techniques et sociales. Elle emploie directement plus de 10 000 personnes et le chiffre d'affaires à l'exportation est d'environ 1 Md€/an. L'éolien maritime apporte de nouvelles opportunités industrielles et commerciales pour les entreprises françaises.

Le bilan environnemental de l'éolien est largement positif, en particulier grâce aux très faibles émissions de gaz à effet de serre et autres polluants atmosphériques. Les impacts des éoliennes sur les espèces, sur le bruit et sur les paysages font l'objet d'études et d'une réglementation qui permettent de les maîtriser et de les réduire.

L'appropriation sociétale de l'éolien constitue la principale condition de son développement. A cet égard, l'ADEME insiste sur l'importance de la concertation lors du montage de projets et sur l'intégration environnementale. L'implication financière locale des citoyens ou des collectivités dans les projets constitue par ailleurs un fort levier sur la perception de l'éolien, permettant le développement de projets territoriaux structurants.

Afin de maintenir une dynamique de développement et de renforcer la compétitivité de la filière, l'ADEME souligne la **nécessité d'une visibilité réglementaire et économique de long terme**, ainsi que d'une politique nationale de soutien à la Recherche et Développement sur l'éolien à la hauteur des enjeux.

Enfin, l'ADEME rappelle que les efforts de développement de la filière éolienne, comme de toutes les énergies, doivent avant tout se fonder sur une vision d'un système énergétique durable et être accompagnés d'efforts importants de réduction des consommations.