



EXPERTISES

**Mars
2022**

LES AVIS DE L'ADEME

L'énergie éolienne terrestre et en mer

À retenir	2
Enjeux.....	3
Description.....	3
Chiffres clés.....	4
Une compétitivité croissante.....	5
Développement économique de la filière.....	5
Appropriation sociétale.....	6
Bilan environnemental.....	6
L'éolien dans le système électrique.....	8
Perspectives d'évolution.....	9
Le petit Eolien.....	10
Actions de l'ADEME.....	10

L'énergie éolienne, terrestre et en mer

À retenir

La neutralité carbone visée en 2050 nécessite l'accélération des dynamiques actuelles de **sobriété et d'efficacité énergétique**. Parallèlement l'électrification des usages énergétiques (transport, chauffage, industrie) est un levier fort de la décarbonation de la société en profitant du mix de production électrique peu carboné de la France qu'il faudra renforcer. Le développement de l'éolien est indispensable à cet objectif, qu'il soit terrestre ou en mer sur des fondations fixes ou flottantes.

La filière éolienne, en tant qu'énergie décarbonée, a d'ailleurs une place centrale dans la plupart des scénarios prospectifs français dont Transition(s) 2050 de l'ADEME, avec des capacités de production comprises entre 65 et 136 GW en 2050 contre 19 GW fin 2021.

Le rythme annuel de développement de l'éolien en France doit donc s'accélérer pour respecter les objectifs de production d'énergies renouvelables (EnR) et de décarbonation, en concertation avec les collectivités locales et les citoyens, **en veillant à une meilleure répartition territoriale**, tout en minimisant les impacts potentiels sur l'environnement.

- **L'éolien terrestre et en mer sont à présent compétitifs économiquement** en comparaison aux moyens conventionnels de production d'énergie. Leurs coûts vont continuer à diminuer du fait des évolutions technologiques et des éoliennes de nouvelles générations. Pour minimiser le coût du système électrique à l'horizon 2050, la filière de l'éolien terrestre apparaît comme la plus intéressante. Ses objectifs de déploiement sont donc plus contraints par des questions d'appropriation territoriale que de coût.
- La filière éolienne dans son ensemble est créatrice de valeur ajoutée, d'emplois locaux et d'innovations techniques et sociales. Elle représente plus de 22 000 emplois directs et indirects, plus de 900 sociétés fortement ancrées dans les territoires et un chiffre d'affaires annuel de plus de 5,7 Milliards d'euros. L'éolien en mer fixe et flottant apporte de nouvelles opportunités industrielles et participe au dynamisme de l'économie maritime française.
- **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, sur l'intégration environnementale et paysagère. Les projets éoliens participatifs sont nécessaires à l'accélération de la transition énergétique qui doit se faire par et pour les collectivités et citoyens. Pour améliorer cette appropriation et réduire les coûts d'intégration de l'éolien au système électrique à long terme,

une adaptation des soutiens publics favorisant une meilleure répartition territoriale des projets sera utile.

- **L'éolien terrestre et en mer est très faiblement émetteur de gaz à effet de serre** (12,7 gCO₂/kWh pour le terrestre et 14,8 gCO₂/kWh en mer) **et de polluants atmosphériques**, ceci tout au long de son cycle de vie. Son développement en France permet d'éviter la consommation de combustibles non renouvelables en France et en Europe, et joue un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique. Etant donné le caractère récent du parc éolien français et le fait que **95 % de la masse des éoliennes est constituée de matériaux facilement recyclables**, les volumes de matériaux à recycler associés à la réhabilitation du parc ne devraient être significatifs qu'à compter de 2025. A l'horizon 2050 et suivant les scénarios prospectifs de l'ADEME, la consommation annuelle de béton liée aux fondations reste faible comparée à la production française. En revanche, les approvisionnements en terres rares sont à sécuriser pour l'éolien en mer. Il est important que les fabricants poursuivent leurs efforts de substitution de ces éléments dans les technologies déployées en mer.
- **Les projets éoliens sont soumis à la réglementation ICPE.** Leurs impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages devraient rester maîtrisés par une mise en œuvre efficace de la séquence ERC (Eviter-Réduire-Compenser). Des marges de progrès existent pour continuer à les éviter et les atténuer. Dans les scénarios ADEME en 2050 où les capacités de l'éolien terrestre sont les plus développées (63 GW), la surface artificialisée par les éoliennes représenterait moins de 10 000 ha, soit 0,03 % de la surface agricole utile en France.
- **Grâce à sa production plus forte en période hivernale, l'énergie éolienne participe activement à l'équilibre offre-demande du système électrique national et européen. Elle contribue de façon importante à la sécurité d'approvisionnement électrique et à l'indépendance énergétique de la France.** Le recours progressif à des éoliennes de plus grands diamètres devrait encore améliorer cette contribution, grâce à leur facteur de charge plus important. A l'horizon 2030, la variabilité de production de l'éolien ne nécessite pas de construire de nouvelles centrales thermiques de réserve.

Afin de maintenir une dynamique de développement et renforcer la compétitivité de la filière, l'ADEME souligne la **nécessité de continuer à améliorer la planification, à simplifier la réglementation et à maintenir une visibilité économique de long terme**, ainsi que de soutenir une politique nationale de Recherche et Développement sur l'éolien à la hauteur des enjeux.

ENJEUX

Globalement, pour limiter le réchauffement climatique en deçà des 2°C, la neutralité carbone doit être atteinte d'ici la deuxième moitié du 21^{ème} siècle. En cohérence avec cet objectif, la France, via la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), vise la neutralité carbone en 2050. Pour y arriver, une transition énergétique est nécessaire et elle passera par la sobriété, l'efficacité énergétique et une électrification progressive de nos usages, afin d'éliminer les énergies fossiles du mix énergétique.

Quel que soit l'orientation du mix énergétique à l'horizon 2050, **il est urgent d'accélérer le déploiement de toutes les filières des EnR électriques**. Elles participent à la diversification du mix, à la sécurité d'approvisionnement en énergie et sont un moyen d'améliorer la résilience du système électrique. En France, 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 est d'environ 24 % en 2020).

Dans ce contexte, l'énergie éolienne offre, pour le système électrique français, un potentiel technique important et encore largement sous-exploité. La France possède en effet le deuxième gisement technique de vent en Europe (le premier pour l'éolien terrestre). Pour atteindre les objectifs fixés par la LTECV, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) fixe un objectif de puissance installée de 33,2 à 34,7 GW d'éolien terrestre et 5,2 à 6,2 GW d'éolien en mer en 2028, soit environ 15 000 mâts terrestres et 700 fondations en mer. **Cela nécessite de doubler le rythme actuel de déploiement de l'éolien.**

A plus longue échéance en 2050, et pour atteindre la neutralité carbone, l'énergie éolienne (terrestre et en mer) pourrait ainsi devenir la première source

d'électricité en France comme en témoigne les travaux prospectifs de l'ADEME, Transition(s) 2050. Les différents scénarios étudiés prévoient à minima que l'éolien produise 22 % du mix énergétique en consommation finale. Cela représente entre 58 GW et 63 GW d'éolien terrestre, et entre 14 GW et 50 GW d'éolien en mer, avec un développement important des éoliennes flottantes.

Le cadre de soutien à l'éolien terrestre existant en France a conduit à une relative concentration des installations dans les zones les plus ventées, en particulier dans les régions Hauts-de-France et Grand Est où près de la moitié de la puissance du parc national a été installée. Même s'il est important de rechercher les meilleures conditions de vents, les analyses prospectives de l'ADEME montre qu'une meilleure répartition des capacités sur le territoire pourrait minimiser les coûts pour la collectivité, du fait du moindre besoin de flexibilité sur le réseau électrique.

Dans un premier temps, afin de sécuriser l'atteinte des objectifs de la PPE, une cartographie non contraignante des zones favorables au développement de l'éolien terrestre est en cours à l'échelle de toutes les régions. Cette planification doit permettre un développement plus harmonieux de l'éolien, mieux réparti, en prenant en compte les réalités locales et l'ensemble des enjeux environnementaux, et doit se faire dans la concertation avec les régions, les intercommunalités et les communes. Une planification spatiale du développement de l'éolien en mer, sur les différentes façades maritimes, sera également essentielle pour permettre son déploiement.

DESCRIPTION

Une éolienne est caractérisée par sa puissance nominale. En France, la plupart des éoliennes terrestres que l'on installe aujourd'hui ont une puissance unitaire de 2 à 4,5 MW, pour un diamètre de rotor compris entre 75 et 150 mètres. En mer, les éoliennes installées ont des puissances de 5 à 10 MW et des diamètres de rotor de 130 à 180 mètres. Les prochaines générations de turbines auront des puissances supérieures à 15 MW.

Le facteur de charge, soit le rapport entre la puissance moyenne effectivement délivrée et la puissance nominale installée, est un indicateur de la productivité des éoliennes (ou des parcs éoliens). Il dépend,

outre des caractéristiques techniques des éoliennes, des conditions météorologiques (vitesse du vent, densité de l'air et turbulence). En France, le facteur de charge national moyen constaté des éoliennes à terre sur ces cinq dernières années est de 23,5 %. Les machines terrestres de nouvelle génération, caractérisées par des rotors de plus grand diamètre et pour des génératrices de puissance standard (parfois appelée éoliennes toilées) fonctionnent à pleine puissance par des vents plus faibles, ce qui leur permet d'atteindre des facteurs de charge moyens de 30 % dans les mêmes conditions de vent.

¹ Europe's onshore and offshore wind energy potential, AEE, 2009.

² <https://transitions2050.ademe.fr/>

³ https://librairie.ademe.fr/cadic/6843/modelisation_et_optimisation_des_mix_electriques_2020-2060.pdf

⁴ Instruction du Gouvernement du 26 mai 2021 relative à la planification territoriale et l'instruction des projets éoliens.

⁵ Actuellement, chaque projet fait l'objet d'un débat public. Voir section énergies renouvelables dans <https://www.debatpublic.fr/>

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 à 50 % pour les nouveaux projets), ce qui rapproche leur productivité de celle des centrales hydroélectriques au fil de l'eau.

Les éoliennes en mer flottantes se distinguent des éoliennes posées par l'accès à une ressource encore plus abondante (car plus éloignée des côtes du fait de l'exploitation des zones de profondeurs comprises entre 50 et 200 m). L'éloignement des côtes à des

distances supérieures à 15 km diminue les contraintes liées aux autres activités (notamment la pêche professionnelle). L'intérêt du flottant réside aussi dans la facilité d'installation des éoliennes puisque la plupart des solutions de flotteur permettent un montage de l'éolienne à quai et une installation en une seule phase limitant les travaux et opérations en mer. L'éolien flottant est moins dépendant des conditions des fonds marins. Ces conditions étant assez hétérogènes au large des côtes françaises, elles nécessitent des études spécifiques pouvant remettre en cause certaines options technologiques, notamment pour l'éolien posé.

CHIFFRES CLÉS

Contexte international

Selon les données du Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), la puissance éolienne installée dans le monde au cours de l'année 2020 a atteint 93 GW, pour une capacité totale en fonctionnement à fin 2020 de 743 GW. L'Asie constitue le premier marché mondial, en particulier du fait de la Chine (+ 52 GW en 2020). Au total dans le monde en 2020, 1 592 TWh ont été produites par les éoliennes (soit environ 6 % de la production mondiale), dont 7 % par l'éolien en mer.

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. Les éoliennes en Europe (E27+UK) ont produit 458 TWh en 2020. Cela représente 16 % de la consommation électrique européenne.

Pays	Taux de pénétration de l'éolien en 2020 dans les pays historiquement très engagés dans son développement (taux de couverture de la
Allemagne	27
Espagne	22
Danemark	48
Irlande	38
Royaume-Uni	27

Source: [Wind energy in Europe in 2020](#), WindEurope, 2021

Selon l'Agence Internationale de l'Energie, le rythme annuel de développement de l'éolien doit s'accélérer pour atteindre la neutralité carbone en 2050 à l'échelle mondiale. Pour cela, entre 2030 et 2050, 340 GW d'éolien terrestre et en mer devraient être installés chaque année ; soit une multiplication par un facteur 4 environ, par rapport à la capacité installée en 2020.

L'électricité éolienne en France

La filière éolienne française a été lancée en 1996, avec le programme EOLE 2005.

A fin 2021, la puissance totale raccordée au réseau français est de 18,8 GW. La filière constitue la seconde source de production d'électricité d'origine renouvelable. Le taux de couverture moyen de la consommation électrique par la production éolienne est de 8 %.

Les premiers parcs éoliens en mer (Fécamp, Courseulles-sur-Mer, Saint-Nazaire, Saint Brieuc) devraient quant à eux être mis en service d'ici 2023. Trois autres projets d'éoliens en mer posés verront le jour avant 2028 (Iles d'Yeu et de Noirmoutier, Dieppe Le Tréport, Dunkerque). La planification sur les différentes façades maritimes est en cours et d'autres appels d'offres ont été lancés (Normandie, Centre Manche)¹⁰. La puissance totale des projets éoliens posés attribués fin 2021 était de 3,5 GW.

L'Etat français soutient aussi l'éolien flottant : quatre projets de fermes pilotes flottantes d'environ 30 MW chacune (une en Bretagne et trois en Méditerranée) sont en cours de développement à l'instar des deux fermes similaires en opération en Ecosse et au Portugal. Par ailleurs, la PPE prévoit l'attribution de deux parcs éoliens en mer flottants de 250 MW chacun au large de la Méditerranée et un parc de 250 MW également au sud de la Bretagne. Des extensions de 500 MW supplémentaires pour chacun de ces parcs sont à prévoir.

⁶ Offshore Wind Outlook 2019, IEA, November 2019

⁷ Global wind report 2021, GWEC, 2020.

⁸ Wind Power, IEA, 2021.

⁹ Net zero by 2050, IEA, 2021.

¹⁰ <https://www.eoliennesenmer.fr/>, du Ministère de la Transition Ecologique

UNE COMPÉTITIVITÉ CROISSANTE

L'éolien terrestre et en mer sont à présent compétitifs économiquement en comparaison aux moyens conventionnels de production d'énergie. De plus, le coût de production de l'énergie éolienne est par nature plus stable, puisqu'il ne dépend pas de la volatilité du cours des combustibles.

Pour les nouvelles installations de production d'électricité, toutes technologies confondues, l'éolien terrestre en France présente parmi les coûts complets de production les plus faibles. Les derniers appels d'offres terrestres ont récompensé des projets à un coût moyen de 60 €/MWh. D'ici 2030, les coûts complets de production devraient ainsi atteindre environ 32 à 58 €/MWh pour l'éolien terrestre¹¹.

Concernant l'éolien en mer en France, après renégociation, les premiers parcs ont été attribués à des prix entre 131 et 155 €/MWh. Depuis, l'augmentation des capacités industrielles en Europe, de la taille des ro-

tors et des parcs, ont permis une forte diminution des prix (hors raccordement) : autour de 50 €/MWh pour de nombreux nouveaux parcs en mer du Nord, et même 44 €/MWh pour le futur projet de Dunkerque attribué en 2019. L'éolien flottant n'a pas encore atteint le même niveau de maturité et présente des coûts plus élevés. D'ici 2030, les parcs flottants pourraient atteindre des coûts inférieurs à 100 €/MWh.

Par ailleurs, la France a été classée en 2019¹², au 3^{ème} rang des pays les plus attractifs pour le développement des EnR, fortement tirée par ses scores sur l'éolien terrestre et en mer, ce qui témoigne des conditions favorables au développement de ce type de technologies dans le contexte français. La stimulation de l'investissement dans les capacités de production éoliennes par les mécanismes incitatifs successifs a permis à l'éolien de s'insérer dans un marché existant qui n'était pas favorable à l'investissement car largement constitué d'équipements déjà amortis.

DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE DE LA FILIÈRE

Bien qu'une majeure partie des éoliennes soient importées pour l'éolien terrestre, à défaut de présence de grands turbineurs français à rayonnement international, les retombées économiques sur le territoire français ont été évaluées à environ 60 % du coût complet d'un parc (et 90 % en Europe)¹³.

Ainsi, la réalisation d'études et le développement, la fabrication des composants (notamment des fondations) l'installation des machines, l'exploitation et la maintenance des parcs emploient déjà **22 600 personnes en France** environ, directement¹⁴ et indirectement¹⁵. L'éolien est désormais le premier employeur du secteur des EnR. Les emplois sont notamment en forte croissance en Pays de la Loire et Normandie grâce à l'éolien en mer. L'implantation industrielle de l'ensemble des projets en cours de construction sur les façades maritimes ont déjà entraîné des retombées économiques locales avec près de 5 000 ETP recensés, plus de 800 M€ de chiffre d'affaires en 2020,

et 3 usines majeures. La filière française s'est aussi constituée autour d'une activité à l'export, portée notamment par la production de nacelles par GE Renewable Energy, de sous-stations électriques par les Chantiers de l'Atlantique ou encore la production de couronnes d'orientation par Rollix Defontaine¹⁶.

Ainsi, la filière éolienne française se compose en 2021 de 900 entreprises fortement ancrées dans les territoires et un chiffre d'affaires annuel de plus de 5,7 Milliards d'euros¹⁷. Les différents clusters régionaux actifs sur la thématique ont guidé et continuent d'accompagner les entreprises souhaitant se diversifier dans l'éolien, concourant ainsi à structurer la filière. Cependant, les fabricants français peinent encore à rattraper leur retard par rapport à leurs homologues danois, allemands ou espagnol.

¹¹ « Coûts des énergies renouvelables et de récupération », ADEME 2020

¹² Renewable Energy Country Attractiveness Index, EY, 2019

¹³ ADEME, chiffre issu des AO 2020 (hors raccordement, opérations et maintenance)

¹⁴ Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans les secteurs des énergies renouvelables et de récupération, des transports terrestres et du bâtiment résidentiel, Situation 2017-2019 - Perspective 2020 - Objectifs 2023. Synthèse générale, ADEME

¹⁵ Observatoire de l'éolien 2021, Capgemini invent

¹⁶ Observatoire des énergies de la mer

¹⁷ « Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération », ADEME Juillet 2021.



APPROPRIATION SOCIÉTALE

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'EnR, les projets éoliens participatifs et/ou à gouvernance locale concourent à un meilleur ancrage dans les territoires, participent au développement local en optimisant les retombées économiques et sociales localement, et permettent aux habitants de s'approprier la question énergétique. En 2015, la LTECV a notamment facilité l'implication des citoyens et des collectivités dans les projets d'EnR. Deux directives européennes encouragent les Etats-Membres à soutenir ces initiatives¹⁸. L'ADEME identifie deux dynamiques complémentaires :

- L'implication dans la gouvernance, se matérialisant par un investissement financier au capital des sociétés de projet assortis d'un pouvoir de décision conférant aux collectivités et habitants une réelle maîtrise du projet. Les collectivités agissent souvent via des Fonds Régionaux ou des Sociétés d'Economie Mixte. Les particuliers se rassemblent localement pour constituer des sociétés d'investissement locales ou investissent via l'outil national développé par Energie Partagée ;
- La 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 qui ne donne pas accès aux décisions prises dans le projet regroupe les plateformes de *crowdfunding*.

Des mesures incitatives instaurées par le Ministère de la Transition Ecologique favorisent le développement de parcs éoliens citoyens par rapport aux projets portés par des développeurs seuls (bonus de notation et accès à un guichet de financement au fil de l'eau). Pour accélérer la dynamique de ces projets à gouvernance locale et les accompagner, une feuille de route a été mise en place avec « 10 mesures en faveur des énergies renouvelables citoyennes »¹⁹ et une campagne de communication du Ministère sur les énergies citoyennes²⁰ a été lancée.

Si 73 % des Français ont une bonne image de l'éolien, cette proportion est encore plus importante dans les Hauts-de-France et le Grand Est (77 % et 75 % respectivement), régions où sont implantés le plus grand nombre de parcs éoliens. Cette adhésion est même plus marquée pour les personnes ayant une résidence principale ou secondaire à moins de 10 km d'un parc éolien (80 % de bonne image, 79 % favorable au développement de l'énergie éolienne)²¹. Cependant, les opposants à l'installation d'un parc à côté de chez eux mettent en avant la crainte du bruit des machines et jugent que celles-ci ne sont pas esthétiques et nuisent au paysage²².

Ces enjeux acoustiques et paysagers sont bien pris en compte dans l'encadrement réglementaire de l'éolien et chaque site d'implantation éolien potentiel est étudié au cas par cas pour garantir une intégration du projet la meilleure possible dans son environnement sonore et paysager.



BILAN ENVIRONNEMENTAL

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, de l'ordre de 12,7 gCO₂/kWh pour le parc terrestre installé en France²³ et 14,8 gCO₂/kW pour le parc éolien en mer posé. 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 électrique français qui est de 34 gCO₂/kWh²⁴ et celui du mix européen de 216 gCO₂/kWh²⁵ en 2020. 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'électricité. Selon RTE, les émissions évitées grâce à la production éolienne et solaire se chiffrent à environ 22 millions de tonnes de CO₂ par an²⁶.

L'éolien présente également l'un des **temps de retour énergétique** parmi les plus courts de tous les moyens de production électrique²⁷. Les calculs sur le parc français montrent que l'énergie nécessaire à la construction, l'exploitation et le démantèlement d'une éolienne est compensée par sa production d'électricité en 12 mois pour l'éolien terrestre et 14 mois pour l'éolien en mer ; durée à mettre en perspective de la durée de vie moyenne des parcs de 20 ans à terre et 25 ans en mer.

¹⁸ Directive du parlement européen et du conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, journal officiel de l'Union européenne, 21.12.2018

¹⁹ 10 mesures en faveur des énergies renouvelables citoyennes, Ministère de la Transition Ecologique, Novembre 2021.

²⁰ <https://www.ecologie.gouv.fr/energies-citoyennes>

²¹ « Les Français et l'énergie éolienne », sondage Harris Interactive pour le Ministère de la Transition Ecologique, Août 2021.

²² « Les Français et l'environnement », vague 8, ADEME, décembre 2021.

²³ « Impacts environnementaux de l'éolien français », ADEME 2016.

²⁴ Bilan électrique 2020, RTE.

²⁵ Electricity market report – December 2020, IEA.

²⁶ Prévisions sur les bilans CO₂, RTE 2020.

²⁷ « Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation », GIEC, 2011.

L'exploitation d'une éolienne ne génère pas de déchets liés à la consommation de combustibles, en dehors de la gestion de fin de vie des installations, ni de pollution de l'air. De plus, elle ne nécessite pas de prélèvement, ni de consommation d'eau. Il s'agit là de réels atouts pour l'éolien du point de vue environnemental. L'énergie éolienne contribue ainsi 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. Son développement permet d'éviter la consommation de combustibles non renouvelable en France et en Europe, et joue un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique²⁸.

En ce qui concerne l'usage des sols à proprement parler, l'éolien terrestre a l'avantage de ne pas entrer en concurrence avec les activités agricoles. En effet les surfaces réservées et qui ne permettent pas d'autre usage des sols se limitent aux fondations et aux aires de servitude (chemins d'accès...). Même avec 63 GW d'éolien terrestre en 2050 comme indiqué dans le scénario le plus ambitieux de Transition(s) 2050, la surface artificialisée (strictement incompatible avec un usage naturel, agricole ou forestier) par les parcs éoliens représenterait moins de 10 000 ha²⁹, soit 0,03 % de la surface agricole utile en France.

La préservation de la biodiversité

Les projets éoliens doivent maîtriser les impacts environnementaux et respecter les objectifs de la stratégie nationale pour la biodiversité³⁰.

Les observations montrent que les taux de mortalité aviaire et de chauve-souris varient en fonction des espèces concernées, du lieu, et de la configuration du parc. Plus que le nombre de spécimens tués, ce sont surtout les espèces concernées, leur sensibilité, leur statut de protection et les effets potentiels sur la population qui sont des facteurs à prendre en compte. Ce dernier point est souvent le plus difficile à évaluer car la dynamique démographique des populations et leur distribution géographique sont souvent mal connues. A cela, peuvent s'ajouter d'autres types d'incidences, comme la perte d'habitats pour certaines espèces ou la dégradation des milieux naturels compte tenu des emprises des parcs et des voies d'accès. L'ADEME s'est fortement investie ces dernières années pour développer la connaissance des incidences et définir les moyens efficaces d'y remédier, notamment à travers le soutien à de très nombreux projets de recherche.

En mer, la connaissance des impacts potentiels de l'éolien reposent principalement sur des retours d'expérience de parcs éoliens posés à l'étranger et doivent

être consolidés dans le cadre du déploiement des parcs français. L'acquisition de nouvelles données écologiques sur le littoral français est indispensable pour définir des zones de moindre impact et procéder à l'évitement dans la séquence ERC (Eviter-Réduire-Compenser). C'est pourquoi, la mise en place d'un observatoire de l'éolien en mer a été annoncée en 2021.

Si l'impact des éoliennes sur la biodiversité est globalement faible par rapport à d'autres activités (ex : agriculture, urbanisation, infrastructures de mobilité, exploitation de la forêt), il doit être pris en compte dans le développement des projets à l'échelle locale, et évalué plus précisément en terme cumulatif à l'échelle globale. Au niveau local, une étude d'impact est réalisée, nécessaire à l'obtention de la demande d'autorisation, afin d'éviter au maximum, de réduire voire de compenser ces impacts (séquence ERC). Un véritable travail d'intégration environnementale est ainsi déjà effectué par les parties prenantes lors de l'élaboration des projets. Pour certaines espèces, en particulier les chauves-souris, des techniques ont été développées 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, pour une diminution négligeable de la production d'électricité³¹. Des systèmes de détection-bridage sont également installés pour éviter les collisions avec les espèces d'oiseaux protégées. En mer, des solutions sont développées, préconisées et mises en place pour minimiser les impacts liés à l'installation des parcs éoliens³².

Au niveau national, la mise en cohérence des objectifs de neutralité carbone, auquel contribue l'éolien, et de zéro perte nette de biodiversité s'appuie sur l'ensemble des parties prenantes (professionnels, associations de préservation des milieux naturels et des espèces sauvages, services de l'Etat). 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 15 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. Ces partenariats ont été élargis avec notamment l'Union Internationale de Conservation de la Nature (UICN), le Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France Nature Environnement (FNE) et, l'Office Français de la Biodiversité (OFB), via un premier accord-cadre commun signé en 2022. Dans ce contexte, un centre de ressource Energies Renouvelables et Biodiversité est d'ailleurs en cours de développement pour approfondir les connaissances, faciliter les échanges et accompagner la montée en compétence des acteurs de la transition écologique.

²⁸ Synthèse de l'étude des bénéfices liés au développement des énergies renouvelables et de récupération en France entre 2000 et 2028, ADEME, Artelys, Carpenè L., Chammas M., Humberset L., Michelet A., Peraudeau N. 2022.

²⁹ Transition(s)2050, Quels enjeux pour une gestion durable des sols à l'horizon 2050 ?, ADEME, à paraître.

³⁰ Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres, MEEM (DGPR), décembre 2016.

³¹ Voir le dispositif Chirotech sur le portail : <http://www.eolien-biodiversite.com>

³² Préconisation pour limiter les impacts acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine, MTE, Juin 2020.

De la bonne intégration paysagère de l'éolien

Selon un sondage Harris Interactive¹⁹ récent, l'aspect esthétique de l'éolien, critère subjectif et propre à chacun, partage les Français. Ainsi, pour une personne sur deux, les éoliennes sont considérées comme « belles ». Bien que l'étude d'impact réglementaire inclue déjà une analyse paysagère initiale et la proposition d'un projet paysager pour intégrer pleinement les spécificités et sensibilités du territoire, il apparaît important d'améliorer la prise en compte du paysage le plus tôt possible. En amont des projets, la réalisation d'un « plan de paysages » pour la transition écologique et solidaire qui favorise la concertation et les méthodes participatives permet d'aller bien au-delà de la seule intégration paysagère de l'éolien, avec une prise en compte globale de l'ensemble des autres déterminants du paysage (bâtiments, infrastructures de mobilités, industrie, agriculture et forêts).

Pour conclure, les enjeux paysagers soulevés par l'éolien, sont aussi à mettre en perspective avec les effets du réchauffement climatique et les pertes de biodiversité associées, si aucune action concrète n'est mise en œuvre. Ainsi, il est particulièrement important d'accompagner le grand public dans son appropriation de la transition écologique, pour donner aux EnR et à l'éolien une place dans les paysages de demain. Le charbon, le pétrole et le gaz, qui disposent d'une forte densité énergétique et qui sont extraits pour l'essentiel hors de France (avec un impact paysager souvent important), ont eux aussi radicalement transformé nos paysages et nos modes de vie en favorisant étalement urbain, les zones industrielles et commerciales exclusives, l'intensification et la spécialisation de l'agriculture, etc., tout en faisant l'objet aujourd'hui d'une appropriation sociale forte.

Impacts lumineux

Afin d'assurer la sécurité aéronautique et maritime, les éoliennes doivent être équipées d'un système de balisage lumineux de jour et de nuit. Ces feux d'obstacles sont installés sur le sommet de la nacelle et sont visibles dans tous les azimuts (360°). Suivant la hauteur de l'éolienne, si elle est à terre ou mer, et suivant la disposition du parc, des réglementations différentes s'appliquent.

Ce balisage clignotant peut être gênant pour les riverains et avoir un impact sur le paysage, particulièrement la nuit. Pour remédier à cette gêne, des solutions sont à l'étude. Un groupe de travail sur décision ministérielle a été mis en place dans le but de proposer un panel de solutions, en fonction du contexte local. Il en ressort les propositions suivantes : la mise en place de balises dont les signaux lumineux seront dirigés vers le ciel, la diminution de l'intensité lumineuse, et le balisage circonstanciel (signaux allumés uniquement lors du passage d'un aéronef). Des expérimentations sont en cours pour chacune de ces solutions avant une mise en place progressive, à condition qu'elles soient validées par l'aviation civile et militaire.

Contrôle des impacts acoustiques

En matière acoustique, il faut noter que la distance réglementaire minimale de 500 mètres entre les éoliennes et les habitations, ainsi que les valeurs limites sur le bruit ajouté par les éoliennes à l'ambiance sonore habituelle protège les riverains. En effet, une étude réalisée par l'ANSES³³ en 2008 conclut que la réglementation sur le bruit est bien adaptée et que le développement de l'éolien n'engendre pas de problèmes sanitaires. Actuellement, à 500 mètres 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 recherche et développement des constructeurs 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. Par ailleurs, la question particulière des infrasons a fait l'objet d'études spécifiques. Un rapport plus récent de l'ANSES³⁴ sur ce sujet est également rassurant quant aux effets potentiels de l'éolien sur les riverains : les niveaux d'émission étant inférieurs aux seuils d'audibilité, avec des effets non démontrés chez l'homme, la réglementation des 500 mètres est bien adaptée en l'état. Ce rapport met notamment en avant l'importance d'une bonne information en amont de l'implantation des projets, de sorte à se prémunir d'effets « *nocebo* » dans la population (contraire de l'effet placebo).

L'ÉOLIEN DANS LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Pour pouvoir gérer 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 et la compétence des services météorologiques permettent de prédire de façon optimale la production éolienne d'autant 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 l'équilibre entre l'offre (la production par l'ensemble du mix électrique) et la demande (la consommation) électrique³⁵. Le territoire français dispose à ce titre de quatre régimes de vent décorrélés, ce qui permet un lissage de la production d'autant plus important à l'échelle nationale³⁶.

³³ « 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.

³⁴ « Evaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens », avis de l'ANSES, mars 2017.

³⁵ RTE dispose de 8 centres de commande et a mis en place la plateforme IPES pour prévoir la production des parcs éoliens et photovoltaïques.

³⁶ Bilan électrique 2018 (partie sur l'éolien) et Panorama de l'électricité renouvelable en 2015, RTE.

D'après les données mises à disposition par RTE³⁷ pour l'éolien, l'erreur de prévision de la veille pour le lendemain restera inférieure à l'erreur de prévision sur la demande d'électricité. A noter que la production plus importante de l'éolien en hiver qu'en été suit le profil saisonnier de consommation d'électricité en France. Ainsi, étant donné le bouquet énergétique français et les capacités de prévision à l'horizon 2030, l'introduction de la production éolienne **ne nécessite pas de construire de nouvelles centrales thermiques de réserve**³². En plus de l'amélioration des capacités de pré-

vision, l'utilisation et le développement des interconnexions, l'évolution de la gestion du réseau³⁸ qui s'appuient notamment sur l'effacement des consommations ou le pilotage des productions, l'utilisation des centrales hydroélectriques pilotables (centrales de lacs ou d'éclusée), ainsi que le développement du stockage (chimique et mécanique) pourront apporter la flexibilité nécessaire pour la conduite du système électrique³⁹, et accompagner le développement de l'éolien en particulier, et des EnR électriques en général.

PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

Un secteur porteur d'innovations

Le déploiement du parc et les retours d'expérience des pays pionniers permettent une amélioration continue des performances (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'écoconception⁴⁰. L'éolien est donc un secteur de fortes innovations, qui devraient se traduire par une augmentation de la puissance unitaire des éoliennes, de leur facteur de charge, et de leur productivité, ce qui conduira à une diminution des coûts. La plus puissante turbine certifiée par DNV en août 2021 est une éolienne de 16 MW qui sera commercialisée par MingYang.

Une opportunité de développement de l'économie circulaire

Comme le taux de recyclabilité des éoliennes est élevé, la filière se prête bien à l'écoconception. En effet les éoliennes sont constituées d'acier, de fonte (mât), et de béton (fondations). Ces 3 matériaux sont facilement recyclables et les volumes annuels en jeu pourront aisément être absorbés par les filières de recyclage déjà existantes. Les composites, utilisés en particulier pour la fabrication des pales (moins de 5 % de la masse totale de l'éolienne), constituent un axe de travail important pour l'écoconception à la fois pour l'allègement, la tenue à la fatigue, la baisse de l'empreinte carbone, l'utilisation de matériaux biosourcés, la valorisation et le recyclage en fin de vie.

Étant donné le caractère récent du parc éolien fran-

çais, les volumes de matériaux à recycler associés à la réhabilitation du parc ne devraient être significatifs qu'à compter de 2025. Ceci constitue une opportunité pour renforcer l'économie circulaire, à la fois dans l'utilisation des matières premières et en matière de localisation des bénéfices socio-économiques liés au recyclage.

Pour les éoliennes existantes démantelées à compter du 1^{er} juillet 2022, la réglementation exige qu'au minimum 90 % de la masse totale, fondations incluses soit réutilisés ou recyclés. Cette proportion passera à 95 % au 1^{er} janvier 2024 pour les nouveaux parcs.

Pour l'heure, une valorisation mixte des pales est déjà possible en cimenterie à travers une valorisation énergétique et l'incorporation des résidus au clinker pour créer des matériaux présentant des propriétés différentes. C'est notamment ce qui est pratiqué en Allemagne, pays où les flux sortants du parc éolien sont déjà plus importants. Cette solution de valorisation devrait permettre d'absorber les flux sortants du parc éolien durant la phase transitoire où ces derniers ne sont pas encore suffisants pour permettre la structuration et l'industrialisation d'une filière de recyclage à proprement parler. En effet, s'il existe bien aujourd'hui des solutions techniques pour recycler les composites des pales, une telle industrialisation nécessite d'avoir des flux suffisants, et une bonne visibilité dans le temps pour trouver un modèle économique adapté. Il existe aussi des synergies possibles avec d'autres filières comme celle du recyclage des bateaux de plaisance, qui présentent des caractéristiques comparables à celles des pales. Certains fabricants (Siemens-Gamesa, Vestas) ont déjà annoncé l'installation de pales 100 % recyclable dès 2024.

³⁷ Site internet du service éco₂mix du RTE : <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>.

³⁸ A travers l'intégration des technologies des réseaux intelligents ou « smart grids ».

³⁹ Voir : <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques> et <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/5352-prospective-transitions-2050-feuilleton-mix-electrique.html>

⁴⁰ Voir : <https://etipwind.eu/roadmap/>

Par ailleurs, la problématique de l'utilisation par l'industrie éolienne des « terres rares », mérite d'être précisée. Le néodyme, le praséodyme et le dysprosium sont les trois éléments entrant dans la composition des aimants permanents intégrés à certaines génératrices électriques. Leurs gisements sont stratégiques et, comme toute extraction minière, génère des impacts environnementaux. Cependant, le parc éolien terrestre français est peu consommateur d'aimants permanents. Seule 6 % de la capacité installée y a recours dans des génératrices à aimants permanents (650 kg / MW pour les génératrices sans multiplicateur mécanique (PMG-DD))⁴¹. Les éoliennes en mer déployées dans les années à venir, contiennent des généra-

trices à aimants permanents pour réduire la masse des nacelles, les pièces mécaniques tournantes et les coûts d'exploitation. A l'horizon 2050, suivant les scénarios prospectifs de l'ADEME, le besoin français pour les éléments néodyme, praséodyme et dysprosium (pour 47 GW d'éolien en mer) pourrait représenter 1,7% de la production actuelle mondiale de ces éléments, ce qui s'avère supérieur à la part de la France dans le PIB mondial. La question des terres rares n'apparaît pas critique mais conduit à un autre axe de travail centré sur leur recyclabilité, et sur le développement de solutions alternatives⁴². Des solutions de substitutions aux terres rares dans les aimants permanents seront probablement possibles⁴³.

LE PETIT ÉOLIEN

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).

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 2019, 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. 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 % à une production du même ordre de grandeur que les consommations des exploitations agricoles. En autoconsomma-

tion, 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 machines, 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 dans une démarche qualité, il est indispensable de se rapprocher de professionnels reconnus, par exemple via l'Association Française des Professionnels du Petit Eolien (AFPPE)⁴⁴.

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'appropriation des projets** : depuis plus de 20 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 de guides, l'organisation de formations et d'actions de communication. De plus, afin de diversifier les modèles de développement et d'appropriation sociétale, l'ADEME accompagne des projets d'initiative locale à travers le financement d'études de faisabilité ou la mise au point d'outils juridiques ou financiers. Elle 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 assistance⁴⁵.

⁴¹ Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie, ADEME, Octobre 2020.

⁴² Transition(s) 2050, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, ADEME, Février 2022.

⁴³ Voir notamment : Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, CC Pavel, 2017.

⁴⁴ <https://afppe.org/>

⁴⁵ <https://energie-partagee.org/outils/les-reseaux-regionaux/>

Enfin, l'ADEME contribue à l'appropriation des projets éoliens, de la transition énergétique et écologique à travers de nouveaux partenariats pour permettre une meilleure intégration environnementale et paysagère des énergies renouvelables ;

- le **soutien aux avancées technologiques** : dans le cadre du Programme d'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 production⁴⁶ ;

- la **recherche et développement** : les principales actions portent sur les paysages et sur l'évaluation, l'évitement, la réduction et la compensation des impacts sur la biodiversité, à terre et en mer.

POUR EN SAVOIR PLUS

Publications

- Guide pratique ADEME « Le défi éolien en 10 questions », 2021
- Guide ADEME-AMORCE « L'élu et l'éolien », 2018
- Etude ADEME « Filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie », 2017
- Etude ADEME « Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières », 2017
- Etude ADEME « Impacts environnementaux de l'éolien français », 2016
- Etude ADEME « Etat de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts », 2020
- Le Vrai/faux sur l'éolien terrestre, Ministère de la Transition Ecologique, Mai 2021.
- Conseil de défense écologique, « développement harmonieux de l'éolien terrestre », MTE, 2020

Sites Internet

- <https://eolien-biodiversite.com> : portail internet ADEME/MTES/LPO
- TRANSITION(S) 2050, 4 scénarios ADEME pour atteindre la neutralité carbone en 2050

Statistiques et suivi en temps réel des productions

- <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>
- <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-0>

⁴⁶ Les fiches des projets lauréats sont disponibles sur le site : <http://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/innover-developper/investissements-davenir/projets-laureats>