

# 8. La production éolienne

Cahier spécial  
réalisé avec  
le soutien  
de la direction  
scientifique de



## TECHNOLOGIE

L'éolien,  
une énergie d'avenir

## ÉCONOMIE

Une filière **mature**

## SOCIÉTÉ

L'attrait **écologique** du vent. Interviews de Robert Bellini, ingénieur au service Réseaux et énergies renouvelables de l'Ademe, de Olivier Labussière, chercheur au laboratoire de recherche en sciences sociales Pacte, et d'Alain Nadai, chercheur au Cired

CHERCHEURS D'ÉNERGIES

Site éolien près de Rethel  
dans les Ardennes.

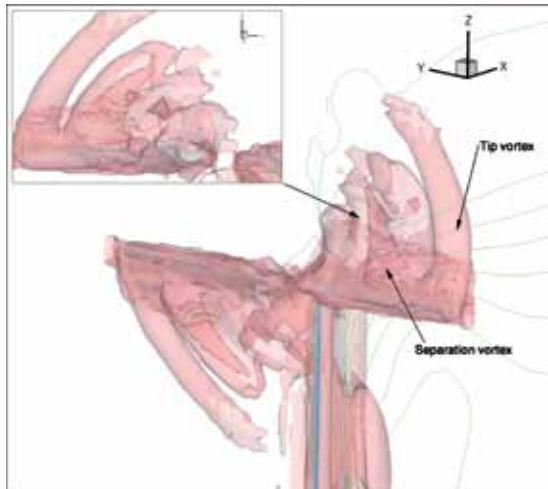
Tous les deux mois, ce cahier *La Recherche* vous permet de comprendre les défis technologiques, économiques et environnementaux des énergies.

# L'éolien, une énergie d'avenir

*Pour assurer le déploiement de l'énergie éolienne, les chercheurs se tournent vers des solutions plus sûres et plus performantes.*

*Les pales d'éolienne sont profilées pour générer la puissance maximale à partir du vent qu'elles reçoivent. Leur conception dépend donc d'exigences aérodynamiques.*

*En bas, modélisation d'un sillage calculé par l'Onera à 13 m/s de vent sur une éolienne à deux pales.*



Le monde entier s'y est mis. De la vallée du Rhône aux collines désertiques de Californie en passant par la province du Yunnan en Chine, des milliers d'hectares sont aujourd'hui recouverts de grands mâts surmontés d'hélices. La production d'énergie éolienne a en effet connu une très forte croissance ces dix dernières années. Selon l'Association européenne de l'énergie éolienne (EWEA), la puissance installée dans le monde était de 240 gigawatts (GW) fin 2011, soit dix fois plus qu'en 2001. La Chine est aujourd'hui devenue le leader, avec 63 GW, détrônant les États-Unis (47 GW). L'Allemagne arrive en troisième position (29 GW),

suivie de l'Espagne (21 GW), de l'Inde (16 GW), de l'Italie (6 GW) et de la France (6 GW).

«L'énergie éolienne commence à faire sa place dans le mix énergétique mondial», explique David Augeix, directeur Développement France chez EDF Énergies nouvelles. *Dans certains pays, comme l'Espagne ou le Danemark, elle est même devenue un moyen de production d'électricité important.* Au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon ? L'écart est encore grand. Mais des efforts technologiques sont menés, par exemple à travers l'Appel à manifestations d'intérêt de l'Ademe sur le Grand Éolien, pour contribuer au déploiement de cette énergie renouvelable située au cœur des stratégies de lutte contre le réchauffement climatique.

## Chercher des vents plus forts

De grands progrès ont déjà été effectués en matière de puissance. Celle-ci est passée, en moyenne, de 0,5 mégawatt (MW) en 2000 à 2,1 MW en 2011. Certaines machines de 6 MW existent déjà, comme celles situées dans le parc d'Estinnes en Belgique. Le projet européen UpWind étudie pour sa part la faisabilité d'éoliennes de près de 20 MW. «Pour atteindre de tels niveaux, il faut augmenter considérablement la taille des éoliennes», explique Élodie Perret, chargée de mission Éolien au Syndicat des énergies renouvelables. *En effet, la puissance est d'autant plus élevée que la surface balayée par les pales en rotation est grande.* Il s'agit aussi d'aller chercher, en s'élevant, des vents plus forts et plus réguliers.

Concevoir de tels «géants» n'est pas aisé : les contraintes exercées sur une éolienne s'intensifient avec sa taille. À la fois légers et résistants, les composites sont par conséquent devenus incontournables. Les pales sont

désormais construites en fibre de verre imprégnée de résines polyester ou époxyde. D'autres composites, encore plus complexes, sont à l'étude pour améliorer les propriétés en fatigue, la résistance et la mise en œuvre.

L'amélioration du rendement des éoliennes constitue une autre préoccupation des constructeurs. Pour y parvenir, l'un des moyens consiste à modifier la géométrie des pales. Dans ce but, et afin de réduire les efforts mécaniques subis par la structure, Marc Rapin, chercheur à l'Onera, tente de comprendre la manière dont ces structures sont déformées lors de leur fonctionnement. «Nous simulons les écoulements du vent combinés à la rotation le long des pales pour évaluer leur comportement en flexion et en torsion», précise-t-il.

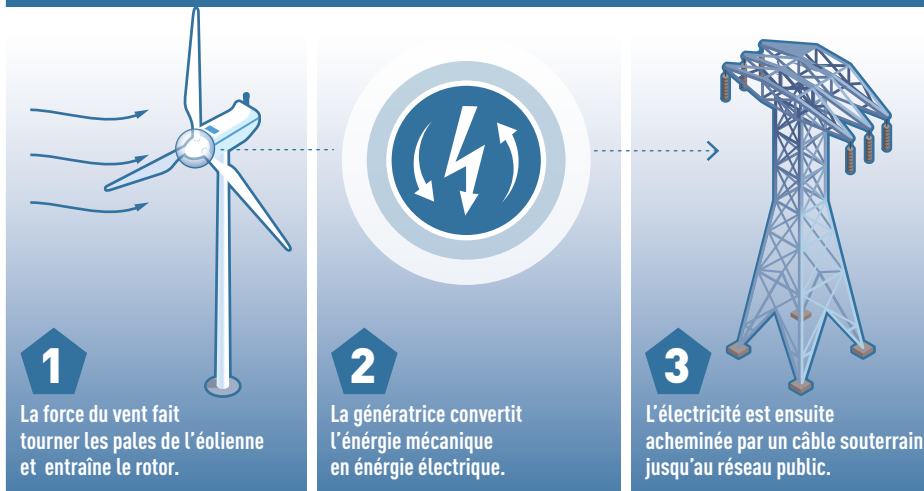
Parmi les nouveaux modèles développés grâce à ce type de recherches, la nouvelle pale Quantum courbée, développée par Siemens aux États-Unis, est capable de se déformer pour diminuer les efforts qui se reportent sur l'ensemble de la structure. De son côté, Enercon a conçu une structure équipée d'ailettes pour diminuer les pertes aérodynamiques en extrémité de pale et réduire les effets de sillage, ces turbulences provoquées par la rotation des pales. «Celles-ci se propagent parfois aux éoliennes suivantes, perturbant alors leur fonctionnement», précise Marc Rapin.

À plus long terme, la révolution pourrait venir de pales actives. Dans ce cas, comme sur les ailes d'avion, on vient modifier localement l'écoulement par un système actif, un volet par exemple. On peut aussi piloter le couplage torsion/flexion avec des systèmes piézoélectriques. Le problème de tels systèmes actifs est la consommation d'énergie qu'ils génèrent.

## Vers une technologie hybride

Dans la course au rendement, la performance des génératrices est aussi primordiale. Leur rôle est de convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique via un alternateur. Plusieurs technologies se côtoient. Nécessitant de tourner à très grande

## FONCTIONNEMENT D'UNE ÉOLIENNE



vitesse, les génératrices les plus répandues sont équipées de multiplicateurs destinés à accélérer le mouvement du rotor. En effet, sous l'effet du vent, les pales tournent à une vitesse relativement lente, comprise entre 5 et 15 tours par minute. Certains types d'éolienne, à entraînement direct, ne sont pas équipés de multiplicateurs. Dans ce cas, le générateur est plus grand et plus lourd.

Enfin, la troisième technologie est dite hybride: il n'y a alors qu'un seul palier de multiplication. «*Les recherches se focalisent sur l'optimisation de systèmes à entraînement direct et hybrides*», indique Daniel Averbuch, responsable de programme à IFP Énergies nouvelles. *En limitant le recours au multiplicateur, ces technologies présentent l'avantage de réduire le nombre d'engrenages, et donc de frottements, tout en assurant une meilleure fiabilité.*» Elles peuvent également permettre des gains de poids dans la nacelle.

### Sonder l'atmosphère terrestre

D'autres recherches visent à optimiser le contrôle commande. Ce système nerveux central équipé de microprocesseurs pilote les systèmes d'orientation de la nacelle et des pales pour les tourner face au vent et ainsi maximiser la production, tout en réduisant les charges mécaniques sur les composants critiques de l'éolienne. Il est pour cela associé à des capteurs de mesure, notamment une girouette, qui donne l'orientation du vent et un anémomètre, qui donne la vitesse du vent. Mais ces deux outils sont peu à peu remplacés par le lidar. Cette technologie utilise un laser pour sonder l'atmosphère terrestre. À partir des signaux rétrodiffusés, la vitesse et la direction du vent peuvent ainsi être mesurées jusqu'à une distance de 400 mètres. «*Un tel outil pourrait servir à anticiper les flux de vent avant qu'ils*

*Le démonstrateur Sabella D03, immergé dans l'estuaire de l'Odette en 2008-2009, a permis de vérifier que les poissons ne sont pas dérangés.*

*n'atteignent l'éolienne, ce qui permettrait alors un meilleur contrôle de cette dernière*», explique Daniel Averbuch. Au-delà de la puissance et du rendement, on cherche aussi à améliorer le facteur de charge des éoliennes. De quoi s'agit-il? Le facteur de charge

désigne le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement en équivalent pleine puissance d'une éolienne et le nombre d'heures de fonctionnement maximal dans l'année, soit 8 760 heures. En France, ce taux de charge s'établit en moyenne à 22%. Les éoliennes sont en effet conçues pour produire un maximum de puissance pour des vents d'environ 50 km/h, soit 14 m/s. Pour les vitesses inférieures, la production est plus faible et pour les vitesses supérieures la production est bridée.

Comment améliorer le facteur de charge? Le vent étant, par définition, intermittent, la marge de manœuvre est faible. Pour satisfaire les pointes de consommation, on a parfois recours à des systèmes de production rapidement mobilisables, comme des turbines à gaz ou des barrages. On peut aussi importer de l'électricité. Les industriels se penchent néanmoins sur des solutions visant à exploiter >>>



## Exploiter les courants marins

**L**es courants de marée représentent une énergie qui, contrairement aux vents, sont périodiques et prévisibles. Pour capter cette énergie, les chercheurs travaillent à la mise au point d'hydroliennes, équivalentes sous-marines des éoliennes. Le principe consiste à installer des turbines dans l'axe des courants de marée. Lors des phases montantes et descendantes, ces courants actionnent des pales reliées à des rotors chargés de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, acheminée ensuite par des câbles sous-marins. Le défi technologique tient toutefois à leur maintenance. «*Les hydroliennes sont destinées à fonctionner dans un milieu hostile, où l'accès est rendu délicat à cause de l'existence même des courants dont on désire exploiter l'énergie*, confie Jacques Ruer, responsable Innovation chez Saipem. *Elles doivent donc être conçues en vue d'obtenir une grande fiabilité pour limiter les interventions.*» Beaucoup de projets sont au stade de prototype dans le monde. En France, EDF réalise un parc de démonstration en Bretagne. Sabella, financé par l'Ademe, développe un projet à Ouessant. À ce jour, seule l'hydrolienne SeaGen de Marine Current Turbines (MCT), en Irlande du Nord, est raccordée au réseau.

>>> une gamme étendue de conditions de vent. Certaines éoliennes récentes sont conçues pour fonctionner avec des vents dépassant les 200 km/h. La machine est alors freinée grâce à un dispositif de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale tout en limitant les contraintes sur la structure.

Un autre enjeu est l'automatisation des procédés de fabrication, afin d'optimiser la conception d'éoliennes. « On cherche à robotiser la soudure des grands mâts par exemple », explique Dominique Ghiglione du Centre technique des industries mécaniques (Cetim). Par ailleurs, des innovations sont aussi attendues dans la surveillance en temps réel et à distance des infrastructures de l'éolienne. Objectif : intégrer des capteurs d'analyse vibratoire pour prévenir l'usure des engrenages et des éléments tournants, à l'origine de nombreuses pannes.

### Développer les parcs offshore

L'avenir de l'énergie éolienne se jouera également en mer. Plusieurs parcs offshore sont en train de voir le jour dans le monde. Ils sont constitués d'éoliennes ancrées au large. Cet engouement s'explique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cela permet de s'affranchir en partie du problème posé par l'altération du paysage. Les parcs offshore sont aussi moins limités en puissance, alors que sur terre,

la construction de parcs de plusieurs dizaines d'éoliennes est rare. Enfin, le vent est beaucoup plus fort et constant que sur terre. Un facteur de charge compris entre 35 % et 45 % est attendu en mer du Nord. Ce chiffre pourrait même augmenter dans le cas d'éoliennes flottantes, situées plus au large.

« Au-delà des contraintes propres aux éoliennes de manière générale, l'éolien en mer se heurte à d'autres difficultés », explique Sébastien Hita Perona, directeur Marketing et business développement chez Areva Wind. La logistique est bien plus complexe, puisqu'il faut acheminer les éoliennes au large par bateaux. De plus, l'installation des fondations à des profondeurs de 30 mètres avec de forts courants nécessite des procédures spécifiques pour garantir la sécurité des hommes et des équipements. »

La maintenance est aussi un problème particulier. Intervenir en mer est non seulement difficile mais aussi coûteux. Areva a mis au point des générateurs hybrides de 5 MW dont le risque de pannes est réduit et les opérations de maintenance sont facilitées. Ils fonctionnent depuis octobre 2009 en mer, dans le parc Alpha Ventus au large de Bremerhaven en Allemagne.

« En mer, un autre problème est la corrosion de l'eau », explique Dominique Ghiglione. D'où l'intérêt de concevoir des revêtements adaptés.

Depuis cette salle de dispatching, les ingénieurs de RTE surveillent le réseau électrique. Ils utilisent notamment les prévisions météorologiques pour anticiper la production d'électricité éolienne, et ainsi mieux équilibrer l'offre et la demande.

Des enduits à base de zinc sont ainsi proposés pour recouvrir et protéger les systèmes de fixation, essentiellement les boulons et les vis.

### Une somme de défis

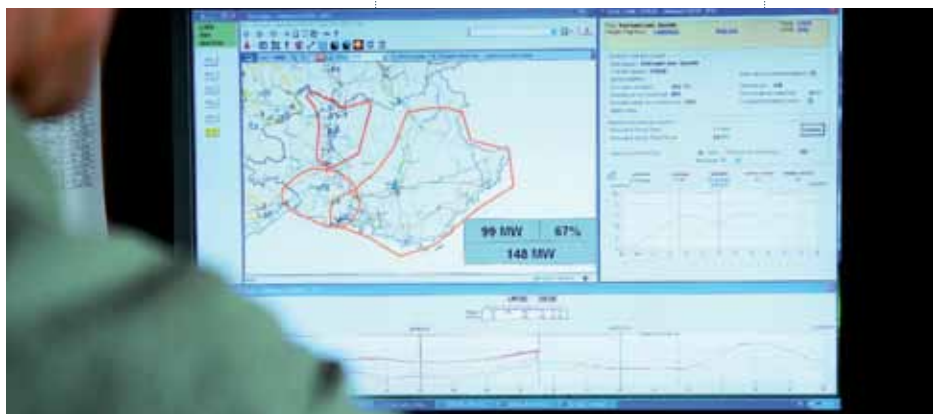
Sur terre ou en mer, l'énergie éolienne est amenée à se développer. Un tel déploiement nécessite toutefois d'adapter les réseaux. « Le défi est tout d'abord géographique, relève Hervé Mignon, directeur Économie, prospective et transparence chez RTE, gestionnaire du réseau électrique français. Les éoliennes sont installées là où il y a du vent. Or ces zones sont souvent éloignées des centres de consommation. Il faut donc déployer des infrastructures de transport d'électricité pour accueillir et acheminer cette nouvelle production. »

Le fait est que les zones de vents forts sont justement situées dans des zones fragiles car moins bien connectées au réseau électrique, comme la Bretagne et la région Sud-Est notamment. La connexion des champs offshore nécessite pour sa part une forte puissance de transmission, complexe à assurer en milieu sous-marin.

Le défi est aussi opérationnel. La variabilité de l'éolien va conduire à modifier les modalités de gestion du réseau pour ajuster l'offre et la demande. Ce problème pourrait être compensé par un stockage, même partiel. Mais la solution viendra surtout de meilleures prévisions météorologiques (voir encadré ci-contre).

En France, des fibres optiques ont également été installées par RTE au niveau des postes d'injection pour suivre au plus près la production éolienne. Intégrées dans des réseaux de plus en plus intelligents, ces informations sont utilisées par RTE pour maintenir en temps réel les différents paramètres de qualité de l'onde électrique (tension, fréquence...).

RTE estime toutefois que l'intégration de l'électricité éolienne dans le réseau actuel est possible à hauteur de 10 GW, en particulier grâce à la présence de plusieurs gisements de vent indépendants. « L'Europe dispose d'une dizaine de régimes de vent différents, la production éolienne n'est donc jamais nulle au même moment partout, explique Bernard Tardieu de l'Académie des technologies. En interconnectant les différents réseaux de transport d'électricité et en mutualisant les différents parcs de production européens, cette source d'énergie intermittente est plus stable, donc plus prévisible. » Néanmoins, l'intensité du vent peut être faible pendant plusieurs jours à l'échelle de l'Europe, ce qui nécessite de compenser cette baisse de production. ◆



### ◆ UN DISPOSITIF DE PRÉVISION DES VENTS

Conçu par RTE, le système IPES utilise les données issues de prévisions météorologiques pour prévoir les vents et ainsi anticiper la production d'électricité d'origine éolienne. Sa marge d'erreur est aujourd'hui de 3 % à l'échéance d'une heure et de 7 % à l'échéance de 72 heures. « L'objectif de ces prévisions est de mieux gérer l'intermittence des flux d'énergie éolienne et, à terme, photovoltaïque sur le réseau », indique Hervé Mignon, directeur Économie, prospective et transparence chez RTE. Dans un second temps, ces données, étendues à l'échelle de l'Europe, pourraient permettre de cumuler l'ensemble des productions éoliennes interconnectées, en espérant qu'un vent favorable à tel endroit compense un calme plat ailleurs.

# Une filière mature

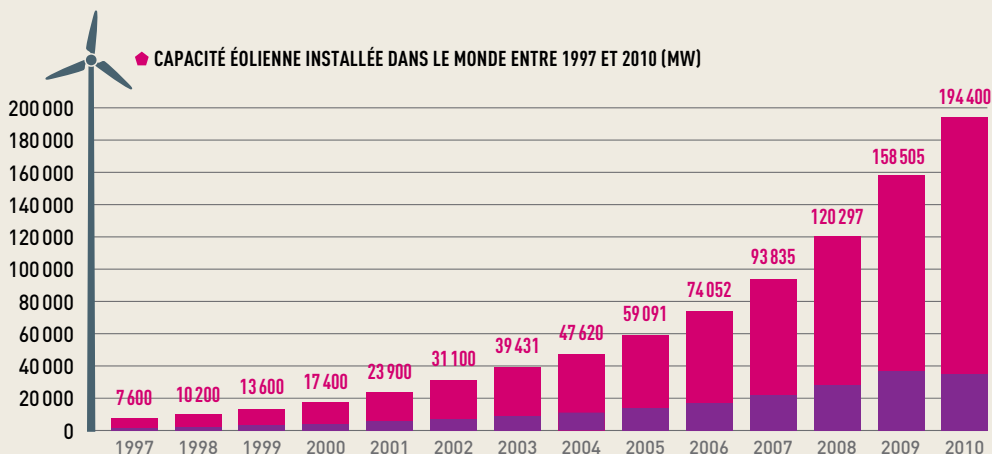
*Affichant un coût stable et déjà compétitif dans certaines régions, l'éolien terrestre est une solution énergétique prometteuse. Son déploiement en mer ouvre de nouvelles perspectives de croissance.*

L'éolien est une des filières renouvelables les plus matures. Sa croissance dans le monde, de 30% par an en moyenne, est en effet considérable depuis une dizaine d'années. Selon le Syndicat des énergies renouvelables, l'éolien représente aujourd'hui 2,4% de la consommation totale d'électricité dans le monde, et a attiré un total d'investissements de 47,3 milliards d'euros. Malgré un certain ralentissement observé en 2010, cette croissance devrait se maintenir dans les prochaines années. Plusieurs zones géographiques offrent un potentiel important : la Chine, les États-Unis, l'Inde et l'Afrique notamment. Le parc installé pourrait atteindre près de 460 gigawatts (GW) en 2015, contre 240 GW fin 2011, selon les experts du Conseil mondial de l'énergie éolienne. En France, les

objectifs du Grenelle sont de 55 millions de mégawatts-heure (MWh) produit en 2020, soit 10% de la consommation électrique de notre pays. Cette maturité se traduit aussi au niveau du coût. «*Ce dernier est stable*», rappelle David Augeix, directeur Développement France chez EDF Énergies nouvelles. Certes, il dépend de conditions locales favorables, mais «*il est compétitif dans certains cas*», précise l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Dans des régions très ventées des États-Unis, du Maroc ou du Mexique, le coût de l'électricité d'origine éolienne est déjà très compétitif. D'après les chiffres de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), il varie entre 72 et 101 euros par MWh. Ce coût dépend en effet de plusieurs facteurs, parmi lesquels les coûts d'accès au financement et des

matières premières notamment. Si la route de l'éolien sur terre semble toute tracée, un obstacle demeure. «*Alors qu'un parc éolien voit le jour en quatre ans environ, l'installation de lignes à très haute tension prend environ dix ans, du fait de procédures administratives souvent redondantes*», explique Hervé Mignon, directeur Économie, prospective et transparence chez RTE. Il est donc impératif de rationaliser ce délai si l'on souhaite accompagner l'essor de la filière éolienne. » La difficulté vient en effet du processus de décision, qui implique d'obtenir l'accord d'un très grand nombre d'acteurs locaux, et est soumis à l'acceptabilité de la population. Les Allemands sont aujourd'hui confrontés au problème, pour relier les champs d'éoliennes de la mer du Nord aux zones industrielles du Sud. Dans la continuité de l'éolien sur terre, «*l'éolien offshore pourrait être un véritable relais de croissance*

pour de nombreux secteurs industriels», estime le cabinet de conseil Xerfi. Des freins existent cependant. Ces derniers sont liés au coût, qui devrait atteindre 183,6 euros/MWh à l'horizon 2016, soit un montant deux fois et demi supérieur à celui de l'éolien sur terre et deux fois supérieur à celui du nucléaire. Selon Sébastien Hita Pérona, directeur Développement chez Areva Wind, «*la diminution des coûts énergétiques dans le domaine de la production d'énergie éolienne offshore constitue un enjeu essentiel pour le secteur*». Le risque est aussi un manque de financement lié à la conjoncture. De même, il faut s'attendre à de nombreux recours administratifs soulignant la gêne visuelle occasionnée, les possibles nuisances environnementales et les conflits d'usage, par exemple, pour des raisons de sécurité de navigation ou avec les pêcheurs. Ce déploiement offshore implique aussi d'organiser les ports pour faciliter la logistique liée à la construction, l'exploitation et la maintenance des parcs. «*Alors que la France n'a pas su, d'un point de vue industriel, prendre le virage de l'éolien sur terre, elle compte se rattraper en mer*», indique Daniel Averbuch, ingénieur de recherche à IFP Énergies nouvelles. Le gouvernement a récemment désigné les consortiums qui construiront les futures fermes éoliennes au large des côtes françaises. Ils sont au nombre de deux : le premier est piloté par EDF (3 projets remportés), le second par Iberdrola (1 projet remporté). Si l'appel d'offres portait sur 3 GW, au final ce sont 1928 MW qui ont été attribués et seront construits. ♦



# L'attrait écologique du vent

*Affichant un bilan carbone très favorable, l'éolien a des atouts pour se faire une place dans le paysage énergétique. Reste à penser au mieux son intégration afin de faire cohabiter cette activité avec son environnement.*

◆ **Le bilan carbone de l'éolien fait aujourd'hui polémique. Cette énergie contribue-t-elle vraiment à la réduction des gaz à effet de serre ?**

**Robert Bellini** : La production d'électricité d'origine éolienne n'émet pas intrinsèquement de gaz à effet de serre. Un reproche, souvent énoncé à l'emporte-pièce, est que des centrales à combustibles fossiles seraient nécessaires pour compenser la variabilité du vent, mais cela ne correspond pas à la réalité de la gestion du système électrique. Même pour des capacités de l'ordre de 20 GW, la production éolienne se substituerait aux capacités de production thermique ou hydraulique, qui seront utilisées pour constituer des réserves. Globalement un indicateur à retenir est la quantité de gaz à effet de serre émis sur toute la durée de vie d'une éolienne, rapportée à la production effective en kWh. Selon un rapport de 2011 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ce chiffre est compris entre 8 et 20 grammes de CO<sub>2</sub> par kWh produit. Cette énergie émet moins de dioxyde de carbone que le nucléaire ou le solaire photovoltaïque. Son bilan est donc très positif.

◆ **La production d'énergie éolienne dispose-t-elle d'autres avantages ?**

**R. B.** : Oui. Tout d'abord, une éolienne ne prélève ni ne consomme d'eau douce. De plus, elle ne produit directement ni dioxyde de soufre ni particules fines ou autre type de pollution de l'air ou de l'eau. Autre atout : l'exploitation de l'énergie éolienne n'implique pas d'opération de forage ou de chaîne de traitement de matières premières. Son empreinte surfacique est égale-

**Robert Bellini**, ingénieur au service Réseaux et énergies renouvelables de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

**Olivier Labussière**, chercheur au laboratoire de recherche en sciences sociales Pacte.

**Alain Nadai**, chercheur au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired).

ment très faible, puisque la présence d'une éolienne est compatible avec les activités agricoles ou forestières. Enfin, le temps d'exploitation nécessaire pour produire autant d'énergie que celle qui a été consommée pour la fabrication d'une éolienne est en moyenne de 5,4 mois, soit l'un des plus faibles parmi toutes les sources d'électricité.

◆ **Qu'en est-il des inconvénients posés par cette énergie ?**

**Alain Nadai** : En France, l'éolien a suscité d'importants enjeux de paysage liés au fait que les premières éoliennes industrielles mesuraient d'emblée plus de 100 mètres, étaient portées par des développeurs privés et mettaient en difficulté les modalités administratives de leur prise en charge. Cela n'a pas été le cas en Allemagne ou au Danemark où l'éolien s'est développé progressive-

ment, à partir de petites éoliennes et en s'adossant à des traditions de gestion collective (assemblées locales de paysage, coopératives agricoles). En outre, dans le cas français, la situation est devenue particulièrement critique dans l'intervalle qui a séparé la « ruée vers le vent » de 2001 et la création en 2007 des premières Zones de développement éolien (ZDE), censées réguler ce développement au niveau territorial. Les administrations locales et les collectivités territoriales ont bien souvent dû élaborer leurs propres outils de planification éolienne.

**R. B.** : Un autre reproche adressé est le bruit émis par les pales. Ce volet fait l'objet de beaucoup d'attention, de la part de tous les acteurs de l'éolien.

Notons qu'un rapport de l'Afsset, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (l'Afssa, Agence française de sécurité sanitaire des aliments, et l'Afsset ont fusionné pour créer l'Anses, Agence nationale de sécurité sanitaire, NDLR), publié en 2008, conclut à l'absence de conséquences sanitaires directes en ce qui concerne l'appareil auditif. En parallèle, une réglementation a été mise en place, fixant des limites ad-



La réussite de l'intégration d'une ferme éolienne dans le paysage est la clé de l'acceptation sociale du projet. (Parc éolien de Chemin d'Ablis, opéré par EDF EN).

## ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PAR TYPE D'ÉNERGIE (G CO<sub>2</sub>EQ/KWH)

Valeur	Mini	1 <sup>er</sup> quartile	2 <sup>e</sup> quartile	3 <sup>e</sup> quartile	Maxi	PSC min	PSC Max
<b>Biocarburant</b>	-633	360	18	37	75	-1368	-594
<b>Énergie solaire</b>	<b>PV</b>	5	29	46	80	217	
	<b>CES</b>	7	14	22	32	89	
<b>Géothermique</b>	6	20	45	57	79		
<b>Hydraulique</b>	0	3	4	7	43		
<b>Océanique</b>	2	6	8	9	23		
<b>Éolienne</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>81</b>		
<b>Nucléaire</b>	1	8	16	45	220		
<b>Gaz naturel</b>	290	422	469	548	930	65	245
<b>Pétrole</b>	510	722	840	907	1170		
<b>Charbon</b>	675	877	1001	1130	1689	98	396

PV = Photovoltaïque, CES = Concentrateur d'énergie solaire, PSC = Piégeage et stockage du carbone

Ces données ont été obtenues en combinant plusieurs estimations réalisées ces dernières années.

Les valeurs minimum et maximum dépendent de conditions d'utilisation exceptionnelles.

De leur côté, les quartiles partagent la population d'éoliennes en quatre parties égales. Pour un quart (25%) de la population, la quantité de CO<sub>2</sub> émise est inférieure au 1<sup>er</sup> quartile, pour un autre quart, cette valeur est comprise entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>e</sup> quartile, pour un autre quart, la valeur est comprise entre le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> quartile et pour le dernier quart, la valeur est supérieure au 3<sup>e</sup> quartile.

missibles d'émergence de 5 décibels (dB) en journée et de 3 dB la nuit. En allant sur site, on peut se rendre compte du très faible niveau de bruit des éoliennes actuelles.

### ◆ Selon certains, les éoliennes décimeraient les oiseaux. Fantôme ou réalité ?

**Olivier Labussière :** Cette question supporte difficilement une réponse schématique. Dans le secteur de la Narbonnaise, un couloir migratoire de rang international, l'éolien a connu un développement précoce, ce qui a incité la Ligue de protection des oiseaux (LPO) à repenser son approche. Elle a expérimenté une méthode de suivi et d'observation individualisée, consacrée aux comportements de l'oiseau à l'approche d'un parc éolien. S'en dégage le constat qu'un parc mal mis en site augmente la dépense énergétique de l'oiseau pour accomplir sa migration, voire suscite des comportements à risque.

Ces observations cumulées ont permis à la LPO de développer une pratique de négociation avec les développeurs privés sur l'implantation des éoliennes. Selon la configuration des sites, des compatibilités entre la politique éolienne et la politique de protection des oiseaux seraient donc possibles. Pour cela, il ne faut pas se contenter du statut d'espèce protégée. Il faut aussi explorer les compétences des différentes espèces par rapport au site, au vent, à la topographie. Ce partage du vent entre l'éolien et les

### Avec entre 8 et 20

grammes de CO<sub>2</sub> par kWh produit, cette énergie émet moins de dioxyde de carbone que le nucléaire ou le solaire photovoltaïque.

### 5

décibels en journée, et 3 décibels la nuit, ce sont les limites admissibles d'émergence mises en place par la réglementation actuelle.

oiseaux n'est pas donné, il reste à construire.

**R. B. :** En ce qui concerne la mortalité directe d'oiseaux, les lignes électriques, les transports ou l'épandage de pesticides engendrent des impacts bien plus importants que les parcs éoliens. De plus, les projets éoliens intègrent obligatoirement une étude d'impact environnemental approfondie, et les couloirs migratoires majeurs sont évités. En réalité, l'impact sur les chauves-souris fait l'objet d'une attention aussi importante car ce sont des espèces vulnérables et encore peu connues. Le projet Chirotech, soutenu par l'Ademe, apporte une réponse technique, avec pour objectif de concilier la préservation des chauves-souris avec la production d'énergie éolienne via la mise en place d'un système de contrôle des machines lorsque surviennent des périodes de forte activité des mammifères volants.

### ◆ Les inquiétudes concernent aussi la faune marine...

**R. B. :** Cela concerne les éoliennes en mer. De larges campagnes de suivi environnemental ont été et continuent à être menées au Danemark. Les résultats d'un suivi de six ans ont été publiés en 2006 par l'Autorité danoise de l'énergie. La conclusion générale est qu'il est possible d'implanter un parc en mer sans impact significatif sur la faune marine. Les éoliennes auraient même un effet positif, certains poissons ayant vu leur population augmenter car les éoliennes en mer servent alors d'abris artificiels.

### ◆ Les éoliennes ont-elles un impact sur l'aménagement du territoire ?

**A. N. :** Oui. L'éolien bouscule nos modes de gestion du paysage. Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le paysage a été érigé en bien commun dont l'État est le garant. Cette tradition française de gestion des paysages est à la fois centralisée et normée. Elle se focalise sur les dimensions visuelle et scénique du paysage. L'éolien, qui suscite des covisibilités très lointaines, a complexifié ces procédures jusqu'à en questionner les principes fondateurs. Développer l'éolien terrestre à hauteur des ambitions nationales ne peut se faire sans une remise en cause de la politique du paysage au niveau local. Les études de cas montrent que les ZDE vont dans ce sens, lorsqu'elles sont effectivement élaborées par les acteurs locaux. Les débats portant sur le devenir des paysages de l'énergie – l'éolien n'étant somme toute que la figure de proue d'une transition énergétique à venir – sont alors innovants et intéressants.

**O. L. :** Il en va ainsi, en quelque sorte, du paysage comme des oiseaux : par l'ampleur des mutations qu'il suscite, l'éolien engage largement ce qui l'entoure, met à l'épreuve les normes en place et appelle à explorer collectivement des valeurs émergentes. Cela requiert des modes de gouvernance ouverts pour apprécier le caractère partagé ou non de ces valeurs. Au vu de ces constats, on peut s'interroger sur la pertinence du tournant normatif que constitue le passage de l'éolien en régime d'Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) issu du Grenelle de l'environnement. ◆

PROPOS RECUEILLIS PAR JÉRÔME VITERBO

Ce cahier spécial **La Recherche** a été réalisé avec le soutien de la direction scientifique de **TOTAL**

#### Comité éditorial :

Jean-François Minster, Total - Olivier Appert, IFP Énergies nouvelles - François Moisan, Ademe - Bernard Salha, EDF - Bernard Tardieu, Académie des technologies - Marc Florette, GDF SUEZ - Jean-Michel Ghidaglia, *La Recherche*.

#### Rédaction :

Jérôme Viterbo

#### Conception graphique et réalisation :

A noir,

**Crédits photographiques :** Médiathèque RTE/William Beaucardet, Onera, Médiathèque RTE/Olivier Guerrin, Yves Gladu, D. Hellstern / EDF EN

Retrouvez ce cahier spécial en français et en anglais sur le site

**planete-energies.com**  
une initiative de **TOTAL**