



Cycle de vie d'une éolienne en mer posée : de la construction au recyclage

Principaux points abordés :

Cette fiche décrit le cycle de vie d'une éolienne en mer posée et présente :

- Les principaux composants de l'éolienne ;
- Le bilan carbone ainsi que le retour des parcs éoliens en mer comparé aux autres énergies (renouvelables et conventionnelles) ;
- Le recyclage d'une éolienne en mer.

1. Les principaux composants d'une éolienne en mer posée

Les éoliennes en mer posées sont **constituées en majorité de parties métalliques** comme le mât et le rotor, qui représentent plus de 90 % de leur poids. Les 10 % restants, notamment les pales, sont faits de matériaux composites, c'est-à-dire constitués d'un assemblage de matériaux différents comme la fibre de verre et de carbone, de résines polyester ou d'époxy.

Les terres rares dans les éoliennes en mer

Selon la technologie privilégiée, les générateurs (qui transforment l'énergie mécanique du vent en électricité) contiennent 150 à 650 kg d'aimants permanents par MW de puissance installée. Par rapport aux électro-aimants classiques, ces aimants permanents permettent d'améliorer le rendement des éoliennes, ont une durée de vie plus longue, sont moins lourds, moins volumineux et exigent moins de maintenance. Ces aimants permanents sont constitués de 32 à 38 % de terres rares¹, des métaux qu'on retrouve aussi dans tous les objets technologiques (téléviseur, ordinateur, disque dur, batteries).

Des travaux de recherche sont en cours pour diminuer voire remplacer les terres rares dans les éoliennes et pour favoriser leur recyclage afin d'en réduire l'extraction. Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), établissement public expert de la gestion des ressources du sous-sol, étudie par exemple des solutions innovantes pour favoriser le recyclage de ces matériaux².

2. Le bilan carbone d'un parc éolien en mer posé

Le bilan carbone d'un parc éolien en mer mesure la quantité de gaz à effet de serre (GES) émis pendant toute la durée de vie du parc, depuis sa conception jusqu'à son démantèlement à l'issue de son exploitation. Il comprend notamment les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des composants du parc éolien, au transport de ces composants et à leur installation, à l'exploitation et à la maintenance du parc, puis à son démantèlement, y compris à la remise en état du site et au traitement des éléments en fin de vie.

1 29 à 32 % de néodyme, 3 à 6 % de dysprosium et moins d'1 % de praséodyme.

2 <https://www.brgm.fr/fr/actualite/dossier-thematique/terres-rares>

Le bilan carbone est exprimé en tonnes équivalent CO₂. Il vise à calculer un indicateur, le facteur d'émission, qui détermine la quantité de CO₂ émise par un kWh d'électricité produite par le parc (exprimé en gramme d'équivalent CO₂ par kWh produit, g éqCO₂ / kWh).

Cet indicateur permet des comparaisons entre les différents dispositifs de production d'électricité.

Les émissions de gaz à effet de serre des six premiers parcs éoliens en mer posés (Yeu-Noirmoutier, Saint-Brieuc, Dieppe-Le-Tréport, Courseulles-sur-Mer, Fécamp et Saint-Nazaire) ont été estimées dans les études d'impacts de ces projets.

Selon le nombre d'éoliennes, leur puissance unitaire, la technologie retenue pour les fondations et le temps d'exploitation, le bilan carbone des parcs éoliens en mer posés français varie comme suit :

- De 554 000 à 754 000 tonnes éqCO₂ émises ;
- Un facteur d'émission entre 14 et 18 g éqCO₂/ kWh produit ;
- Un temps de retour énergétique de 4,5 à 6 ans.

| | Parcs éoliens en mer | Parcs éoliens terrestres | Parcs photovoltaïques | Centrale nucléaire | Centrale thermique à gaz |
|---|----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| Taux d'émissions (en g éqCO ₂ /kWh) ³ | Entre 14 et 18 | 14 | 56 | 12 | 418 |

Plus une éolienne est puissante et fonctionne longtemps, plus son bilan carbone est faible.

Source : [Voir fiche 1 – Le projet éolien en mer en Sud-Atlantique répond aux enjeux de la Programmation pluriannuelle de l'énergie et de la Stratégie nationale bas carbone]

3 Les chiffres pour toutes les filières exceptées l'éolien en mer sont issus de la base carbone ADEME : http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.html
Les chiffres pour l'éolien en mer sont issus des six premiers projets de parc éoliens en mer de 500 MW chacun.

Quels atouts de l'éolien en mer pour le système électrique ?

Le système électrique est composé de l'ensemble des unités de productions, de transport, de stockage et de distribution de l'électricité.

La Programmation pluriannuelle de l'énergie a pour objectif de diversifier le bouquet énergétique : il va évoluer fortement dans ces dix prochaines années, avec une transformation du parc de production d'électricité. Il est prévu la fermeture des centrales à charbon en 2022 et la réduction de la part d'électricité nucléaire de 70 % aujourd'hui à 50 % en 2035. Cette diversification du bouquet énergétique pose donc la question de la sécurité d'approvisionnement en électricité. La quantité d'électricité présente dans le réseau doit en effet être égale à tout instant à la quantité consommée, sans quoi des déséquilibres locaux peuvent se créer et engendrer des pannes de courant généralisées très perturbantes et coûteuses pour l'économie du pays. Il est donc essentiel d'assurer la sécurité d'approvisionnement (l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité) aux niveaux national et européen.

Le bilan prévisionnel établi par Réseau transport d'électricité (RTE) à horizon 2030 montre que si la trajectoire établie par la Stratégie nationale bas carbone est effectivement mise en œuvre, la sécurité d'approvisionnement nationale en électricité sera renforcée. La conjonction des différents facteurs menant à une décarbonation de l'économie, et donc à un système électrique profondément transformé, vont y contribuer :

- Le développement massif des énergies renouvelables, en complémentarité avec le nucléaire, mène à une production d'électricité sur le territoire national plus abondante et diversifiée qu'aujourd'hui ;
- Une dépendance moins importante à chaque moyen de production pris isolément (vent, soleil, eau, biomasse, nucléaire, etc.) permet d'éviter les aléas de production (par exemple : variabilité des énergies renouvelables, arrêt des centrales nucléaires pour maintenance ou à cause de températures élevées, ou aléa générique sur plusieurs réacteurs nucléaires) ;
- La diminution des pointes de consommation compense la variabilité des énergies renouvelables et facilite le pilotage du réseau électrique (équilibre production/consommation) ;
- La progression significative des capacités d'interconnexion avec les pays voisins, et plus globalement au sein du système électrique européen, estimée à +10 GW entre 2020 et 2030, est également un facteur dimensionnant qui contribuera à renforcer la sécurité d'approvisionnement en France.

D'autres solutions de flexibilité, comme le stockage à grande échelle de l'électricité ou la création de nouvelles interconnexions entre pays, sont aussi en cours de développement.

Lorsqu'elles fonctionnent, les éoliennes françaises se substituent à des installations de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles en France ou en Europe (dont la part demeure importante⁴). RTE a montré⁵ que les parcs solaires et éoliens terrestres situés sur le territoire français ont permis d'éviter l'émission de 22 millions de tonnes de CO₂ en 2019 en évitant l'appel à des centrales de production fossiles (5 millions en France et 17 millions dans les pays voisins).

L'électricité renouvelable produite présente en effet un coût de production marginal nul (augmenter la production ne coûte pas plus cher puisqu'elle repose sur une ressource disponible dans la nature : le vent) et est donc plus compétitive que l'électricité issue des centrales de production utilisant des combustibles d'origine fossile coûteux. L'intermittence des éoliennes en mer, dont la production varie avec le vent, ne nécessitera pas de construction de nouvelles unités de production pilotables comme les centrales thermiques pour assurer la sécurité d'approvisionnement électrique.

4 La production d'électricité à partir de combustibles fossiles représente 37 % de la production électrique européenne en 2020. The European Power Sector in 2020, Agora Energiewende et Ember, 2021, p. 4 : <https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2021/01/Report-European-Power-Sector-in-2020.pdf>

5 <https://www.concerte.fr/system/files/concertation/Note%20Bilans%20CO2%20V3.pdf>

3. Le recyclage de l'éolienne

Le développeur éolien est responsable du démantèlement et du recyclage des éoliennes. Le démantèlement des composants des éoliennes s'effectue au port. La récupération des matériaux critiques comme les terres rares contenus dans les turbines est ainsi facilitée. Le recyclage des éoliennes est quasi intégral⁶ :

- Les parties métalliques comme le mât et le rotor constituent plus de 90 % du poids des éoliennes : leur recyclage est organisé dans les filières conventionnelles déjà existantes pour les éoliennes terrestres. L'acier notamment se recycle très bien, la demande étant en constante augmentation⁷ ;
- Le défi le plus important pour le recyclage des éoliennes concerne les 10 % du poids restants, notamment les pales en matériaux composites, ou encore les aimants permanents. Des filières dédiées de gestion de ces déchets devront être créées.

À ce jour, en France, il n'y a pas encore eu de démantèlement impliquant des éoliennes avec aimants permanents. Toutefois, le gouvernement a fixé des objectifs ambitieux de valorisation et recyclage des matériaux des installations classées lors de leur démantèlement, qui concernent notamment l'éolien terrestre⁸ où au moins 95 % du poids des éoliennes devra être recyclé dès 2024. Un recyclage complet des éoliennes en mer est recherché par le développement de filières de gestion des déchets dédiées.

Quant aux pales des éoliennes, des avancées technologiques sont à prévoir dans le recyclage des matériaux composites. Une possibilité consiste à utiliser le broyat de pales pour fabriquer de nouveaux matériaux composites. C'est notamment la solution mise au point par l'université de Washington en collaboration avec General Electric (GE) et Global Fiberglass Solutions Inc (GFSI) de Seattle. Le produit obtenu à partir du broyage des pales serait aussi résistant que les composites à base de bois. De très nombreux usages peuvent être envisagés comme des dalles de sol, des glissières de sécurité le long des axes routiers, des plaques d'égout, des skateboards, des meubles ou des panneaux pour le bâtiment. En moins d'un an, GFSI a recyclé 564 pales selon cette méthode, et l'entreprise estime qu'elle pourrait transformer en produits utiles plus de 20 000 tonnes de déchets de matériaux composites dans les deux années à venir.

Des travaux sont en cours pour optimiser le recyclage des parcs éoliens en mer ou concevoir des pales 100 % recyclables. En septembre 2020, un projet de recherche nommé « ZEBRA » a été lancé par l'Institut de recherche technologique Jules Verne, en partenariat avec un consortium de six acteurs de l'énergie éolienne. Leur objectif est de fabriquer une éolienne aux matériaux et aux composants 100 % recyclable d'ici mi-2024⁹.

Retour d'expérience européen sur le démantèlement et le recyclage

Le développeur éolien en mer anglais, E.ON, a démantelé en mars 2019 deux éoliennes en mer posées de 2 MW du parc de Blyth en Angleterre. Le démantèlement de ces deux éoliennes a duré environ 6 semaines. Il a permis à la filière d'identifier les potentiels champs d'innovation afin de faciliter et de réduire les coûts pour de futurs démantèlements. Une des turbines a été recyclée et réutilisée comme pièces de rechange tandis que la seconde sera utilisée à des fins de formations¹⁰.

6 « En raison du manque d'informations sur la fin de vie des composants, les mêmes scénarios que l'éolien terrestre ont été considérés ». Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France, ADEME, p. 32.

7 *Ibidem* et Observatoire de l'éolien : analyse du marché, des emplois et des enjeux de l'éolien en France, 2019, France énergie éolienne : <https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2019/11/observatoire-2019-final.pdf>

8 Article R.553-6 du Code de l'environnement : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000024498298/2011-08-26

9 <https://www.energiesdelamer.eu/2020/09/24/lirt-jules-verne-et-6-acteurs-industriels-lancent-une-recherche-pour-obtenir-des-pales-deoliennes-100-recyclables/>

10 <https://www.energiesdelamer.eu/2019/03/14/e-on-demantele-ses-deux-premieres-eoliennes-de-2mw-de-blyth/>