

ÉOLIEN EN MER :

UNE EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE RÉDUITE SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE

L'éolien marin constitue l'un des piliers de la transition énergétique à l'échelle de l'Europe. La Commission Européenne affiche ainsi une ambition de 300 GW de capacité installée d'éolien en mer d'ici 2050. Pour réussir ce déploiement à l'échelle industrielle et de long terme, la filière, qui présente d'ores et déjà une empreinte environnementale faible, devra poursuivre sa quête de soutenabilité. L'éolien en mer ne présente pas de problématique spécifique en termes de ressources en matières premières, y compris pour les terres rares. Avec la déconstruction prévue de 85 GW d'éolien en mer aux alentours de 2050¹, le recyclage des équipe-

ments constitue également un point d'attention. En réalité, seules les pales des éoliennes sont actuellement difficilement recyclables et celles-ci sont d'ores et déjà valorisées tandis que de nouvelles réponses pour la recyclabilité des matériaux composites sont en cours de développement. Aussi, l'industrie européenne de l'éolien s'est engagée, au travers de l'association WindEurope, à réutiliser, recycler ou récupérer 100% des pales des parcs éoliens mis hors service dans un futur proche. Le Plan d'Action de l'Union Européenne pour l'économie circulaire constitue également une opportunité pour avancer rapidement sur cette thématique.



1. ORE Catapult : Sustainable decommissioning : wind turbine blade recycling

UNE INDUSTRIE QUI NE MANQUE PAS DE RESSOURCES

Dans le contexte actuel de transition écologique, la consommation en matières premières nécessaires à la construction des infrastructures de production et de réseau d'électricité constitue un enjeu d'importance. Selon une étude parue dans la revue *Energy Policy*, la fabrication des équipements pour l'éolien en mer consomme environ 3,6 kg de matières premières par MWh produit, soit un ordre de grandeur comparable à la production électrique issue des installations nucléaires. De plus, les éoliennes et leurs fondations sont principalement constituées d'acier et de béton, des matériaux qui ne représentent pas d'enjeu spécifique en termes de ressources. Selon des calculs réalisés par le CNRS, le développement de l'éolien à hauteur de 200 GW par an dans le monde (scénario le plus ambitieux de l'IRENA), engendrerait un besoin en béton de l'ordre de 0,2% de la quantité utilisée chaque année pour ce matériau (année de référence : 2018), tandis que ce chiffre serait de 1,5% pour l'acier². L'un des enjeux relatifs à la consommation de matières premières pour l'industrie de l'éolien en mer réside dans l'utilisation d'éléments métalliques de la famille des terres rares. Du néodyme et du dysprosium sont ainsi à ce jour utilisés pour constituer les aimants permanents des aérogénérateurs installés en mer. Contrairement à ce que leur nom peut laisser penser, les terres rares ne sont pas 'rares' dans la croûte terrestre et certains éléments y sont même présents en abondance. Aussi, selon une étude de l'ADEME³, le développement de l'éolien en mer (projection de 120 GW installés à l'échelle mondiale à horizon 2030) n'engendrera pas de problème d'approvisionnement puisque dans ce scénario le besoin annuel en néodyme ne représenterait que 6% de la production et 30% pour le dysprosium (niveau significatif mais qui ne pose pas de problème en termes de ressources). Ces métaux sont dits 'critiques' car ils représentent un enjeu du fait de la répartition géographique inégale des ressources économiquement



Dendrites de dysprosium ultrapures

exploitables⁴. Les gisements sont ainsi très localisés et la Chine représentait 86% de la production mondiale en 2017 (source : Roskill, 2018), conférant au pays un quasi-monopole. Dans son étude sur le sujet, l'ADEME conclut qu'une « éventuelle tension forte sur les terres rares ne semble pas devoir compromettre le développement de l'éolien, en raison notamment de technologies alternatives pour les générateurs électriques ». En effet, des recherches sont menées pour diminuer voire supprimer la quantité de terres rares ou le recours aux aimants permanents sans réduire les performances des machines tout en préservant la compétitivité de la technologie. Les innovations sont nombreuses (élimination des terres rares lourdes, bobinages supraconducteurs, multiplicateurs de vitesse, utilisation de ferrites) et un manufacturier propose déjà des éoliennes en mer sans aimants permanents.



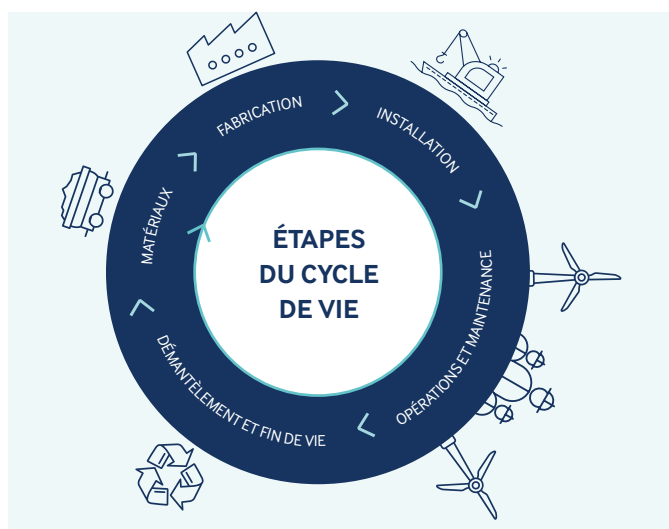
Les industriels adaptent également leurs procédés de fabrication afin de limiter le recours à ce type de matériaux. Siemens Gamesa Renewable Energy, en collaboration avec ses fournisseurs, a notamment développé une nouvelle méthode permettant de façonner directement des aimants permanents selon la forme voulue, évitant des déchets inutiles.

2. Journal de l'éolien – Janvier-Février-Mars 2021

3. ADEME : Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie

4. AIE : The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions

UNE FILIÈRE QUI DÉMONTRE DE BONNES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES



L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés à une certaine activité, pour les traduire en impacts environnementaux. Ce type d'étude permet de comparer les impacts environnementaux de différents moyens de production d'énergie entre eux ainsi que d'identifier la contribution de chaque phase de vie d'un projet à son impact global. L'ADEME a publié en 2015 un document d'ACV de la production d'électricité d'origine éolienne en France⁵. Cette étude démontre que le bilan carbone (mesure de la quantité de gaz à effet de serre émis pendant la durée de vie du parc) d'un parc éolien en mer (14,8 g eq CO₂/kWh, calcul effectué pour les parcs des AO1 et 2) s'avère relativement faible par rapport à l'ensemble de la production d'électricité nationale (72 g eq CO₂/kWh). Une ACV réalisée selon les normes en vigueur par Siemens Gamesa Renewable Energy pour son éolienne en mer de 8 MW conclut qu'une ferme équipée avec ce modèle émet 1% du CO₂ émis par une énergie fossile pour le même niveau de production⁶. Sur 25 ans, cela permettrait d'éviter l'émission de 58 Mt de CO₂, ce qui équivaut à la quantité de CO₂ absorbée par une forêt

de 1 667 km² sur la même période. En termes d'énergie, un tel parc produirait plus de 40 fois plus qu'il n'en consommera durant toute sa durée de vie. L'éolien en mer a également un très faible impact sur les milieux air (émissions d'1,5 fois moins de particules en suspension en comparaison au mix électrique national), sol et eau (qu'il s'agisse de la consommation en eau ou de l'impact sur ce compartiment physique). Il apparaît dans cette étude que le besoin en matières premières et les activités de fabrication (nécessitant d'importants besoins en énergie) représentent l'impact le plus important sur la quasi-totalité des indicateurs retenus. D'autre part la construction et la déconstruction des parcs ainsi que les activités d'opération et de maintenance apparaissent comme des étapes du cycle de vie avec l'impact le plus significatif. De nombreuses pistes d'améliorations sont à l'étude pour limiter l'empreinte environnementale des parcs éoliens en mer et de leurs raccordements : des procédés moins énergivores et à plus faible impact environnemental pour les activités de fabrication, l'adaptation des navires de logistique et de maintenance pour optimiser les trajets, la conversion des bateaux à des modes de propulsion plus propres (la combustion de carburants étant à l'origine des principaux impacts des phases installation/maintenance), l'écoconception ou encore la limitation des pertes électriques.

5 ANS, C'EST LE NOMBRE D'ANNÉES NÉCESSAIRES POUR QU'UN PARC ÉOLIEN EN MER COMPENSE LES ÉMISSIONS DE CO₂ DONT IL EST À L'ORIGINE

7,4 MOIS, C'EST LE TEMPS NÉCESSAIRE POUR QUE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE D'UN PARC ÉOLIEN EN MER COMPENSE LA CONSOMMATION ENGENDRÉE TOUT AU LONG DE SA DURÉE DE VIE (ÉTUDE SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY)

→ Afin de parvenir à une meilleure intégration des aspects environnementaux, socio-économiques et technologiques dans l'analyse de cycle de vie des parcs éoliens en mer, France Énergies Marines a lancé en 2020 le projet LIF-OWI. Celui-ci s'étalera sur 3 ans et entend développer une approche holistique quantifiant la durabilité de ces parcs, identifiant les voies d'améliorations de celle-ci du point de vue environnemental et sociétal et qui pourra servir d'outil d'aide à la décision pour les développeurs-exploitants lors de la conception de leur projet.



Ferme éolienne de Dudgeon – ©Siemens Gamesa

5. ADEME : Analyse de Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France
6. Siemens Gamesa : Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD

LE DÉMANTÈLEMENT DES PARCS ÉOLIENS EN MER ET DE LEURS RACCORDEMENTS, UNE OBLIGATION RÉGLEMENTAIRE

A l'issue de l'exploitation d'un parc éolien en mer, son exploitant est tenu de le démanteler à sa charge, en vue de restituer le site dans un état comparable à l'état qui préexistait à l'installation de l'infrastructure. Il s'agit là d'une obligation légale, inscrite dans les autorisations et qui fait l'objet de garanties financières importantes constituées auprès de l'État dès le début du projet pour s'assurer du respect de la réglementation. L'État contrôle les opérations proposées par l'exploitant du

parc et RTE (retrait des protections, récupération des câbles, démontage de l'ensemble des composants des éoliennes et du poste en mer), celles-ci devant prendre en compte les enjeux environnementaux et respecter un certain calendrier. Les activités de démantèlement constitueront une opportunité pour créer une filière nationale dédiée, bénéficiant de surcroît des retours d'expérience de l'étranger.

LE RECYCLAGE DES PALES, LE PRINCIPAL ENJEU POUR APPROCHER LA RECYCLABILITÉ LA PLUS ÉLEVÉE POSSIBLE

Constituées principalement d'acier, de métaux et de béton (matériaux facilement recyclables), le taux de recyclabilité des éoliennes et de leur sous-structure atteint aujourd'hui un niveau compris entre 85% et 90% (parfois jusqu'à 95% d'après des retours d'expérience pour l'éolien terrestre). Ainsi, après démantèlement des éoliennes, l'acier de celles-ci peut être réutilisé pour produire de nouveaux aciers (de même pour le poste en mer qui est composé à 44% d'acier selon une ACV réalisée par RTE, hors fondation et acier inclus dans les équipements) et le béton sert quant à lui l'industrie de la construction ou pour la confection des routes. Concernant l'éolien flottant, la recyclabilité des flotteurs est à l'étude et leur constitution à base d'acier et/ou béton permet d'envisager un bon taux de recyclage. L'arrêté du 22 juin 2020⁷ fixe un seuil minimum de recyclage ou réutilisation de 90% de la masse totale des éoliennes au 1^{er} juillet 2022 et de 95% au 1^{er} janvier 2024. Les composants les plus complexes à recycler sont ainsi les pales des éoliennes. En effet, afin d'optimiser leurs performances et d'obtenir des pales longues, légères, souples mais résistantes, celles-ci sont constituées de matériaux imbriqués les uns dans les autres. Ces matériaux composites sont actuellement surtout constitués par des fibres de carbone ou de verre, prises dans des résines thermodurcissables (époxy, polyester, etc.). L'inconvénient de ces résines est que celles-ci sont difficilement récupérables en fin de vie et que les fibres, noyées dans une matrice polymère, ne peuvent être recyclées facilement avec les méthodes actuelles. Aujourd'hui, la principale méthode de traitement des pales consiste à les valoriser dans les cimenteries : après broyage, les déchets composites sont transformés en combustible solide de récupération (valorisation énergétique) et les cendres de verre peuvent se substituer au sable utilisé pour la production



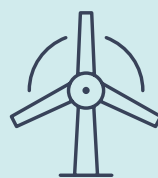
Sortie d'usine pour une pale d'éolienne produite dans l'usine de Cherbourg
© GE Renewable Energy

du ciment (valorisation de matière). Cette technique est d'ores et déjà disponible à échelle commerciale (GE Renewable Energy a notamment signé un contrat avec Veolia) mais celle-ci ne permet pas la récupération et la réutilisation des composites. De nombreuses méthodes sont actuellement développées dans cette optique⁸. Ces procédés thermiques (pyrolyse), chimiques (solvolyse) ou encore électromécaniques (courant électrique en pulsion) ont pour objectif d'améliorer la récupération des fibres de verre et de carbone dans le but de les réutiliser. Ces technologies alternatives ne sont pas encore toutes disponibles à échelle commerciale car encore peu compétitives (les filières de valorisation ont besoin de volumes entrants importants qui devraient arriver avec les premiers démantèlements d'ici 2030) et sont pour le moment gourmandes en énergie. Le besoin de recyclage des matériaux composites n'est pas une spécificité de la filière éolienne (celle-ci représente 10% de ce type de déchets), les solutions émergeront

7. Arrêté du 22 juin 2020

8. WindEurope – Accelerating Wind Turbine Circularity

d'une collaboration multisectorielle. Les industriels s'activent aujourd'hui sur le sujet et GE Renewable Energy a notamment signé un memorandum d'entente avec LafargeHolcim afin de réutiliser les pales pour fabriquer des matériaux de construction et construire de nouveaux parcs éoliens. Des entreprises et des centres de recherche ont également lancé en janvier 2021 le programme DecomBlades, visant à établir des filières industrielles de recyclage des pales d'ici à trois ans. Les recherches sur le recyclage doivent être couplées avec une réflexion globale sur la conception des pales (éco-conception, utilisation de matériaux plus facilement recyclables), leur maintenance ou encore leur possible réutilisation afin de limiter le recours aux incinérations et aux enfouissements. À l'avenir, des résines thermoplastiques, alternative aux résines thermodurcissables, et qui peuvent être refondues après usage, permettront la récupération des matières premières pour fabriquer de nouveaux matériaux. À noter qu'en France les premiers parcs éoliens en mer devant être démantelés à partir de 2045, la filière bénéficiera donc d'un important retour d'expérience suite au démantèlement des premiers parcs européens et il existera probablement une filière de recyclage des pales grâce à l'éolien terrestre.



**85 À 90%,
C'EST LE TAUX
DE RECYCLABILITÉ
D'UNE ÉOLIENNE**

Waste treatment hierarchy



© Manche Drones Production – Pale de 107 mètres produite à Cherbourg, LM Wind Power, un business GE Renewable Energy

Le projet ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch - Recherche sur les pales zéro déchet), piloté par l'IRT Jules Verne, rassemble ainsi acteurs industriels et centres de recherche - Arkema, CANOE, ENGIE, IRT Jules Verne, LM Wind Power, Owens Corning, SUEZ - a pour objectif de développer et concevoir la 1^{ère} pale d'éolienne de taille industrielle 100% recyclable pour une commercialisation d'ici 2024. Il fait suite au projet EFFIWIND, soutenu par l'ADEME et le Programme d'Investissements d'Avenir, qui a permis la fabrication d'une pale en thermoplastique d'une longueur de 23 m. ZEBRA vise à démontrer la faisabilité technico-économique et environnementale de pales d'éoliennes durables, dans une approche d'écoconception afin d'accélérer la transition du marché de l'éolien vers une économie circulaire.

L'INNOVATION COMME RÉPONSE AUX ENJEUX

Qu'il s'agisse de limiter la consommation d'énergie ou de matières premières, de générer moins de déchets et de mieux les recycler, d'améliorer la performance environnementale des matériaux utilisés (acier, etc.), ou encore de faire évoluer le mode de propulsion des navires, ces enjeux trouveront des solutions grâce à de nouvelles innovations technologiques. À terme, ces sujets pourraient représenter des opportunités, par exemple via la création d'une filière industrielle du recyclage des pales (une réglementation plus homogène à l'échelle de l'Eu-

rope pourrait contribuer à son émergence) ainsi qu'un marché pour les activités de démantèlement pouvant générer de nombreux emplois ou encore en contribuant à la transition énergétique du secteur maritime. L'éolien en mer, qui présente déjà une faible empreinte environnementale pourrait ainsi devenir la technologie en pointe sur les sujets de la durabilité des infrastructures de production d'électricité. Tout cela deviendra plus vrai encore avec l'insertion de l'éolien en mer dans des boucles d'économie circulaire maritimes et littorales.



Note réalisée par l'Observatoire des énergies de la mer du Cluster Maritime Français

Rédaction sous la coordination de :

Étienne Pourcher, Christophe Clergeau, Marc Lafosse

www.merenergies.fr

Conception : www.forget-menot.com