



Renouvelables



Les éoliennes sont-elles recyclables ?

Les éoliennes et les panneaux solaires ne rejettent pas de polluants en phase de fonctionnement. Il importe néanmoins que ces filières génèrent le moins possible de déchets sur l'ensemble de leur cycle de vie, et tout particulièrement en fin de vie. Certains composants sont régulièrement accusés de ne pas être recyclables. Qu'en est-il exactement ? Quels matériaux les composent et comment les industriels peuvent-ils les recycler et les récupérer ?



Publié le 17 mars 2023
Modifié le 30 mars 2023

Cet article apporte des éléments de réponse sur les éoliennes, [quand un second traite du photovoltaïque](#).

En quelques mots

La très grande majorité des matériaux composant les éoliennes est recyclable. Plus de 90 % de la masse des éoliennes (acier, béton, aluminium, cuivre) sont réutilisés ou recyclés dans des filières existantes. Une filière de recyclage se met en place pour la fibre de verre, composant majeur des pales qui représente aujourd'hui l'essentiel des matériaux non valorisés.

Un cadre réglementaire rigoureux fixe les conditions du démantèlement et du recyclage des éoliennes. Peu d'installations éoliennes sont déjà arrivées en fin de vie en France, mais entre 25 % et 45 % du parc national actuel devrait être démantelé d'ici 2030. Le développement et le renforcement des filières de recyclage sont nécessaires afin d'être en capacité de traiter ces volumes à venir.

Introduction





Eolienne dans un champ de Colza © Pixabay

Dans cet article, nous nous intéressons au recyclage de l'ensemble des composants des éoliennes terrestres, avec un focus sur les pales des éoliennes, sujet régulièrement médiatisé. Cette question du recyclage mérite l'attention car, si peu d'installations ont déjà atteint leur limite d'âge en France, le parc éolien en fonctionnement commence à être conséquent : 20 600 MW étaient installés fin 2022 pour un marché annuel moyen des cinq dernières années de 1 400 MW, et la programmation pluriannuelle de l'énergie table sur une puissance de 34 000 MW fin 2028 pour l'éolien terrestre. Le parc éolien mondial est quant à lui conséquent, avec plus de 900 000 MW installés fin 2022.

Avant d'être recyclé, un parc éolien est utilisé une vingtaine d'années

Une éolienne est un moyen de capter l'énergie mécanique du vent. Elle est en mouvement au moins 7 500 heures dans une année, soit 150 000 heures en 20 ans, et ces sollicitations génèrent fatigue et usure. Bien que leur dimensionnement soit optimisé pour une durée de vie donnée, actuellement une vingtaine d'années, certains composants doivent être remplacés en raison d'un vieillissement prématuré (lié par exemple à des événements climatiques extrêmes) ou à la suite d'un coup de foudre : les éoliennes étant des points hauts, elles sont sujettes aux impacts de la foudre malgré la pose d'un paratonnerre. La substitution permet aussi parfois de profiter d'un progrès technologique (obsolescence de composants).

La durée de vie d'un parc éolien est déterminée par des critères techniques et économiques. La durée minimale de 15 ans est définie par les contrats d'achat de l'électricité produite dont bénéficie la production d'électricité éolienne. Au-delà, le choix de la poursuite ou de l'arrêt de l'exploitation est du ressort du maître d'ouvrage qui a trois options : a) arrêt du parc éolien et remise en état du site ; b) prolongation aussi longtemps que possible (jusqu'à 30 ans, voire plus) ; c) démantèlement des machines et remplacement par un nouveau parc éolien. Dans les trois cas, les éoliennes actuelles devront être démantelées à un moment ou à un autre, et leurs composants réutilisés ou recyclés.

L'amélioration des performances des éoliennes étant rapide, leur remplacement peut être envisagé même si elles ne sont pas techniquement obsolètes. Par exemple, au début du XXI^e siècle, les machines installées culminaient à 90 mètres de hauteur et atteignaient 0,8 MW de puissance nominale, contre environ 160 mètres et 2,8 MW en 2022. À moyen terme, lorsque les progrès technologiques seront stabilisés, il est probable que les constituants des éoliennes soient conçus pour une durée de vie allongée à 30 ou 40 ans.

Les matériaux d'une éolienne

Une éolienne est constituée de quatre composants qui ont chacun des fonctions et des matériaux spécifiques.



- Le rotor, constitué de pales (aujourd'hui quasi-exclusivement au nombre de trois) reliées entre elles par un moyeu, constitue le système de captation du vent. Les pales sont majoritairement en fibre de verre, avec parfois une part en fibre de carbone.
- La nacelle accueille les systèmes de transformation de l'énergie mécanique du vent, récupérée par le rotor, en énergie électrique. Ses principaux constituants sont un multiplicateur (ou boîte) de vitesse à engrenages (sauf dans le cas des machines à entraînement direct où il est absent), une génératrice électrique et son variateur électronique de puissance ainsi qu'un transformateur.
- La tour soutient la nacelle et permet d'y accéder. Elle abrite le raccordement électrique et parfois aussi le transformateur. Elle est généralement réalisée à partir de plusieurs tronçons assemblés sur site. La tour est généralement en acier, mais parfois aussi partiellement en béton, voire exceptionnellement en bois.
- Les fondations, enfouies dans le sol, sont en béton armé.

La taille des éoliennes augmente d'année en année, notamment pour aller chercher plus haut des vents soutenus. Cela permet également d'avoir des rotors de plus grand diamètre et des machines plus puissantes, donc des productions électriques unitaires plus importantes.

Le tableau suivant renseigne sur le tonnage des matériaux constituant une éolienne, par ordre décroissant d'importance. L'exemple est un modèle type d'éolienne ¹ correspondant à ce qui devrait être installé majoritairement dans les prochaines années.

Puissance 4,2 MW – Moyeu à 112 m	Part du tonnage	Tonnage	Tonnage par MW
Acier (et fonte)	88,5 %	481 t	115 t
Fibres de verre	5,8 %	32 t	7,6 t
Matériaux polymères	2,8 %	15 t	3,6 t
Aluminium et cuivre	1,9 %	10 t	2,4 t
Autres (électronique, lubrifiants, etc.)	1,1 %	6 t	1,4 t

Les fondations d'une éolienne sont également consommatrices de matériaux : béton et acier pour les ferrallages.

Modèle V136-4,2 MW Moyeu à 112 m	Tonnage	Tonnage par MW
Acier	106 t	25 t
Béton	1 500 t	357 t

En ce qui concerne les fondations, leur masse augmente moins vite que celle de l'éolienne elle-même². Ainsi, le ratio entre le poids des fondations et celui de l'éolienne est de 2,9 pour une éolienne de 300 à 400 tonnes et de 1,5 pour une éolienne de 500 à 600 tonnes.

Ces différents tonnages sont sensiblement variables selon le type et le fabricant de l'éolienne ainsi que d'un parc à un autre. Un plus faible gisement en vent impose ainsi un rotor de plus grand diamètre et les caractéristiques du sol peuvent entraîner des fondations plus volumineuses ou un mât (la tour) avec une plus grande quantité de béton.

Une étude de l'ADEME³ a synthétisé et quantifié les consommations de matériaux du parc éolien français de 2015 (donc avec les niveaux de puissance unitaire des machines de l'époque). Les résultats sont les suivants :

	Matériaux	Tonnage par MW
Aérogénérateur	Acier	97 t
	Béton	34 t
	Fonte	22 t
	Composite	11 t
	Cuivre + aluminium	5 t
Fondations	Béton	434 t
	Acier	21 t

Le cadre réglementaire

Le cadre réglementaire en vigueur quant au démantèlement et au recyclage des éoliennes résulte de l'application de

l'arrêté du 22 juin 2020⁴. Plus largement, les éoliennes sont des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) avec les obligations afférentes, dont le respect est surveillé par les inspecteurs ICPE des Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

L'arrêté du 22 juin 2020 oblige au démantèlement intégral des fondations, alors qu'auparavant la règle ne concernait (cas général) que l'obligation d'enlèvement du premier mètre des fondations en béton armé. Par ailleurs, cet arrêté fixe des obligations de réutilisation ou de recyclage des aérogénérateurs, avec une part de tonnage augmentant au fil des ans.

Selon cet arrêté, au moins 90 % de la masse totale des aérogénérateurs, fondations incluses, doivent être démantelés depuis le 1^{er} juillet 2022, avec l'obligation de réutiliser, recycler ou valoriser les déchets de démolition et de démantèlement ou, à défaut, de les éliminer dans des filières dûment autorisées. Le 1^{er} janvier 2024, ces exigences passeront (pour les nouvelles installations) à 95 % de la masse totale réutilisés ou recyclés.

De plus, l'arrêté fixe des exigences spécifiques pour les rotors : depuis le 1^{er} juillet 2022, au minimum 35 % de leur masse doivent être réutilisés ou recyclés. Pour les nouvelles installations, ces exigences passeront à 45 % de la masse des rotors réutilisables ou recyclables le 1^{er} janvier 2023 et à 55 % le 1^{er} janvier 2025.

Zoom sur la définition du recyclage

La prévention de la production des déchets s'appuie sur le « réemploi » et la « réutilisation ». Le réemploi correspond à la « seconde vie » d'un produit. Pour l'éolien, ce marché « d'occasion » est limité du fait de l'augmentation des performances des nouvelles machines, donc de l'obsolescence des anciennes. La réutilisation, quant à elle, suppose une transformation du produit. Pour l'éolien, le marché est là encore réduit à cause de l'évolution rapide des techniques.

Selon la nature et la qualité du recyclage, on peut distinguer le « décyclage » et le « surcyclage ». Le décyclage consiste à recycler plusieurs fois le matériau, lui faisant perdre à chaque fois de sa qualité. Cependant, un matériau de qualité inférieure pour une application donnée peut être de bonne qualité pour une autre, ce qui permet de lui donner une nouvelle utilité. Le surcyclage est le fait d'utiliser un matériau en fin de vie pour en faire un produit avec une valeur ajoutée. On réutilise ainsi un produit qui ne sert plus ou ne peut plus servir, afin d'en faire un produit utile.

Retrouver les propriétés originelles des métaux par le recyclage est techniquement possible, mais c'est plus coûteux, car les métaux sont souvent des alliages, qu'il faut purifier pour reconstituer les nouveaux alliages souhaités.

Approche par matériau

Les solutions actuelles et futures de réutilisation ou recyclage des différents matériaux constitutifs d'une éolienne sont analysées ci-après, en commençant par les plus massifs, et donc par le béton.

Le béton



Le béton est constitué de granulats de différentes dimensions et d'un liant, le ciment. En général, la quantité de béton des éoliennes avoisine les 400 tonnes par MW, soit 1 100 tonnes par machine actuellement installée. C'est l'équivalent de la consommation de béton pour la construction de quelques maisons « classiques ». Le béton est majoritairement utilisé pour les fondations, mais une faible quantité peut aussi se trouver dans la base des mâts de certaines éoliennes.

Après démantèlement, le béton est concassé puis trié. Ce nouveau matériau, neutre, peut alors être valorisé en granulats pour d'autres bétons, notamment celui d'autres éoliennes, ou pour constituer des remblais.

Dans le cadre du renouvellement d'un parc éolien, il n'est pas possible de réutiliser les fondations existantes pour plusieurs raisons techniques. Tout d'abord, l'emplacement des nouvelles éoliennes va différer : les machines étant plus puissantes, la distance entre elles sera plus importante. Même si un emplacement devait être identique, la puissance plus importante de la nouvelle machine demanderait une fondation plus volumineuse. La réutilisation de la fondation existante en l'agrandissant n'est pas envisageable pour des raisons de sécurité, car son vieillissement ne peut pas être calculé. Décrypter l'énergie a consacré un article complet à cette question du béton employé pour les parcs d'éoliennes ⁵.

L'acier

La quantité d'acier représente environ 140 tonnes par MW éolien, soit près de 400 tonnes par machine actuellement installée. On distingue l'acier (et la fonte) de l'éolienne elle-même et l'acier du ferrailage du béton des fondations.

Quantitativement, l'acier est le matériau le plus recyclé au monde : la moitié de l'acier produit en France provient d'acier recyclé. L'acier est recyclable à l'infini, sans perte de ses propriétés.

Le recyclage de l'acier du béton des fondations passe par une phase de concassage et de calibrage puis par une phase de tri qui ne posent pas de souci technique particulier. Ces ferrailles récupérées et l'acier des tours des éoliennes vont être fondus dans un four électrique pour constituer du minerai de fer. L'intérêt énergétique (en consommation d'énergie primaire par unité de masse) du recyclage de l'acier est fort : 3 760 kWh/tonne pour l'acier recyclé contre 6 250 kWh/tonne pour l'acier neuf ⁶.

Les composites

Les pales des éoliennes sont constituées essentiellement de fibres de verre liées par matériaux composites (résines)

pour les lier. L'emploi de fibre de carbone n'est pas nul mais reste limité du fait de sa rigidité et de son coût.

La réutilisation des fibres de verre n'est possible que dans la mesure où le procédé de collage/liage l'autorise. Jusqu'à présent, l'emploi de résines thermodurcissables ne permettait pas de séparer après coup les fibres de verre. Les pales ne pouvaient donc être réutilisées que sous leur forme originale. Cependant, des industriels viennent de mettre au point une résine thermoplastique (collant à température ambiante) autorisant la construction de pièces recyclables ^{7 8 9}.

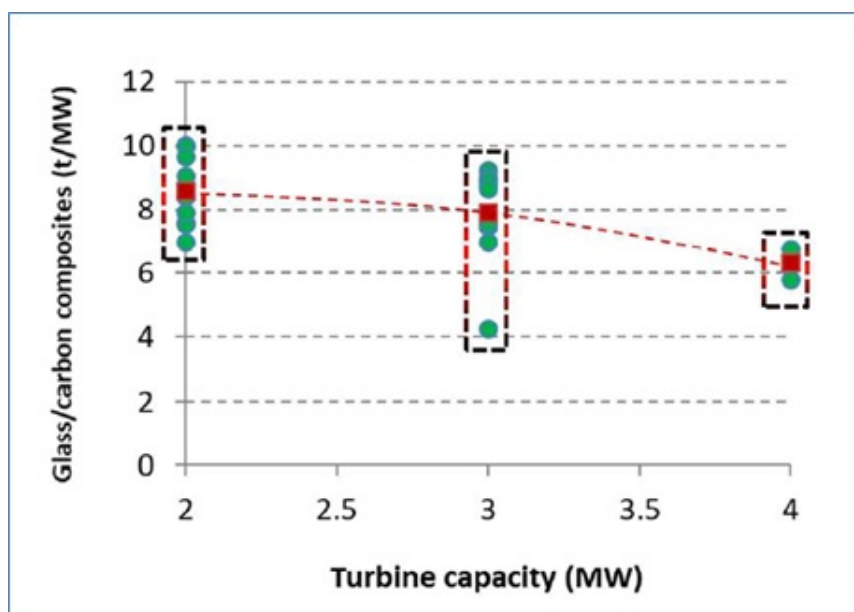
En 2023, le brûlage des pales dans des cimenteries est la valorisation la plus répandue. Les pales entrent alors dans la catégorie des « combustibles solides de récupération ». Mais l'innovation ¹⁰ consiste à différencier la résine, qui brûle et fournit des calories récupérables, des fibres de verre incinérées. Ces dernières permettent d'obtenir une cendre riche en silice et en carbonate de calcium, susceptible de remplacer une partie du sable et de la craie normalement nécessaire à la fabrication du ciment.

La valorisation la moins noble consiste à broyer les pales et à les utiliser comme remblais. S'agissant d'un matériau inerte, cette valorisation ne pose pas de difficultés techniques particulières et n'engendre pas de pollution.

De manière anecdotique, ces pales peuvent être valorisées comme structures de mobilier urbain : abribus, jeux d'enfants, etc. ¹¹

Certains fabricants travaillent à la conception de pales dont il sera possible de réutiliser les fibres de verre. Une des techniques ¹² consiste, dans un premier temps, à séparer les fibres de verre (ou de carbone) et l'époxy. Les fibres peuvent alors être recyclées directement par les filières de traitement existantes. La résine époxy, en revanche, doit subir un second traitement. Elle est alors décomposée encore plus finement grâce à des processus chimiques qui vont la casser en composants de base, proches des matériaux d'origine. Cette nouvelle matière sera ensuite utilisée pour créer de nouveau de la résine d'époxy.

Comme pour le béton, la part de fibre de verre et de carbone dans une éolienne décroît avec l'augmentation de sa puissance ¹³.



Quantité de fibre de verre et de carbone par MW installé en fonction de la puissance d'une éolienne

Il est à noter que ces innovations profiteront également à d'autres filières industrielles qui emploient massivement la fibre de verre, et en premier lieu l'industrie nautique. En 2021, la France comptait un peu plus de 205 000 voiliers et

près de 780 000 bateaux à moteur immatriculés, qui arrivent en fin de vie à partir d'une quarantaine d'années, voire plus.

De l'origine d'un mensonge sur les pales enfouies

Une polémique est née en France en 2021 sur le non-recyclage des pales. Elle est survenue après un reportage télévisé montrant, aux USA, un exploitant de parcs éoliens enfouissant de façon illégale des pales usagées dans une décharge. Par la force des réseaux sociaux, ce reportage a été la base d'une rumeur selon laquelle ce type de non-valorisation concernait les éoliennes françaises. Cette désinformation participe au dénigrement de la production d'électricité par les éoliennes.

Les métaux

Dans une éolienne, le cuivre et l'aluminium sont surtout utilisés comme matériaux conducteurs de l'électricité, l'aluminium se substituant de plus en plus au cuivre.

Les quantités de cuivre et d'aluminium contenues dans une éolienne sont significatives (environ 2,5 à 5 tonnes par MW), car ce sont des métaux courants dans les installations de production d'électricité.

Le cuivre se recycle à l'infini sans perte de propriétés. L'intérêt énergétique de son recyclage est fort ⁶ : 5 700 kWh/tonne sont nécessaires pour le cuivre recyclé contre 7 400 kWh/tonne pour le cuivre neuf. Cet intérêt, qui est aussi économique, se traduit par une filière de collecte et de recyclage performante.

L'intérêt énergétique et économique du recyclage de l'aluminium est encore plus intéressant ⁶ : 2 700 kWh/tonne sont nécessaires pour l'aluminium recyclé contre 43 500 kWh/tonne pour l'aluminium neuf, soit seize fois moins. Là encore, la filière de collecte et de recyclage est performante.

Terres rares

Une partie des éoliennes, tout particulièrement en offshore, utilise des terres rares pour les aimants permanents de leurs génératrices. Il s'agit généralement d'éoliennes dites à « attaque directe », qui fonctionnent sans multiplicateur. Les enjeux sur les terres rares sont stratégiques et environnementaux : la Chine est aujourd'hui en situation de quasi-monopole, avec des extractions impactantes pour les écosystèmes naturels en raison de faibles concentrations, donc d'importants volumes à manier.

L'usage d'aimants à très hautes performances employant des terres rares (néodyme et dysprosium) permet des gains de production électrique par rapport aux solutions sans aimants ou à aimants à plus faibles performances (ferrites) et facilite la maintenance (absence de multiplicateur). À production égale, cet usage limite tellement les besoins en acier et béton pour le mât et les fondations qu'il en résulte globalement un bénéfice environnemental ¹⁴. Ces terres rares peuvent se recycler.

Pour approfondir le sujet des terres rares, voir l'article déjà publié sur le site Décrypter l'énergie ¹⁵.

Autres matériaux

Une éolienne contient enfin des équipements électriques et électroniques, comme des transformateurs et des onduleurs. La gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est encadrée par des directives européennes et le Code français de l'environnement. Depuis 2005, les producteurs de ces DEEE sont responsables de l'enlèvement et du traitement des DEEE professionnels. Du fait de filières industrielles bien structurées, ces DEEE se recyclent très bien, notamment l'or, l'argent et le platine qu'ils renferment.

Le kilowattheure le moins impactant pour l'environnement est toujours celui qui n'est pas consommé et n'a donc pas besoin d'être produit. La sobriété et l'efficacité énergétiques sont donc les deux moyens primordiaux permettant de réduire les impacts environnementaux. Elles doivent être mises en place avant de penser à la production d'énergie renouvelable, donc en amont de la réflexion sur les impacts des éoliennes en termes de consommation de matériaux, et du besoin de leur traitement en fin de vie.

Cependant, une certaine quantité d'électricité reste nécessaire. Parmi les différents moyens de production à notre disposition, l'éolien reste exemplaire. Les matériaux constituant une éolienne sont courants et non toxiques. Ne consommant pas de combustibles, une éolienne ne produit, en fonctionnement, aucun déchet néfaste ou dangereux, au contraire des énergies fossiles et fissiles. Ceci étant, les quantités de matériaux mis en œuvre sont importantes et sensiblement proportionnelles à leur taille.

Si les besoins de matériaux pour l'éolien sont en forte croissance, pour répondre au développement de la filière, ils restent relativement marginaux par rapport l'ensemble des autres besoins¹⁶. Au niveau mondial, la construction automobile engloutit par exemple environ 12 % de l'acier, alors que l'éolien n'en requiert qu'environ 0,4 %. Et même dans le contexte du déploiement accru de l'éolien avec 200 GW/an préconisé par l'IRENA (International Renewable Energy Agency), cette valeur n'atteindrait que 1,5 %.

Le recyclage des composants d'une éolienne est encadré réglementairement : au moins 90 % de la masse d'une éolienne doivent déjà être réutilisés ou recyclés, et les exigences sont renforcées d'année en année. Ces exigences sont le moteur d'un développement des filières industrielles qui rend la production d'électricité éolienne encore plus vertueuse.

Sources et références

1. ↑ *Life cycle assessment of electricity production from an onshore V136-4.2 wind plant*. Vestas. Novembre 2019. <https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20V13642MW%20Wind%20PlantFinal.coredownload.inline.pdf>
2. ↑ *Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France*. Cycleco pour l'Ademe. Décembre 2015. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf>
3. ↑ *Renouvellement de l'éolien : quelles stratégies possibles et envisageables en fin d'exploitation pour les parcs éoliens terrestres ?*, Abies/Everoze/Innosea pour l'Ademe. <https://librairie.ademe.fr/cadic/255/renouvellement-parcs-eoliens-011119v1.pdf>
4. ↑ Arrêté du 22 juin 2020 portant modification des prescriptions relatives aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042056014>
5. ↑ *Bétonisation et artificialisation des terres : quelle contribution de l'éolien ?* Décrypter l'énergie. Mars 2020. <https://decrypterlenergie.org/betonisation-et-artificialisation-des-terres-quelle-contribution-de-leolien>
6. ↑ *Bilan de l'acier*. Base carbone de l'Ademe, consultée en février 2022. <https://base-empreinte.ademe.fr/>
7. ↑ *Résine Elium® : une innovation de rupture dans le monde des composites ?*, Mars 2019. <https://www.arkema.com/global/fr/resources/post/elium-resin-a-disruptive-innovation-in-the-world-of-composites/>
8. ↑ *Vestas looking to scale up blade recycling partnership solution offering*. Décembre 2021. <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/vestas-looking-to-scale-up-blade-recycling-partnership-c3473600>
9. ↑ *Siemens Gamesa pioneers wind circularity : launch of world's first recyclable wind turbine blade for commercial use offshore*. Septembre 2021. <https://www.siemensgamesa.com/newsroom/2021/09/launch-world-first-recyclable-wind-turbine-blade>
10. ↑ *Recyclage des pales d'éoliennes dans le ciment par co-processing*. Kako. Janvier 2021. <https://kakoblogsciences.fr/2021/02/23/recyclage-des-pales-deoliennes-dans-le-ciment-par-co-processing/>
11. ↑ *Recycler des éoliennes en mobilier urbain*. La boîte verte. <https://www.laboiteverte.fr/recycler-des-eoliennes-en-mobilier-urbain/recyclage-eolienne-pale-mobilier-urbain-04/>
12. ↑ *L'éolien règle un de ses problèmes majeurs : le recyclage des turbines*. Décembre 2021. <https://www.numerama.com/sciences/712062-leolien-regle-un-de-ses-problemes-majeurs-le-recyclage-des-turbines.html>
13. ↑ *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*. S. Carrara, P. Alves Dias, B. Plazzotta, C. Pavl . Joint Research Center. 2020. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119941>
14. ↑ *Life cycle assessment of electric power generation by wind turbines containing rare earth magnets*. C. Venås. MSc Thesis report, NTNU Trondheim. 2015. https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2350095/13527_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
15. ↑ *La rareté de certains métaux peut-elle freiner le développement des énergies renouvelables ?* Décrypter l'énergie. Juin 2021. <https://decrypterlenergie.org/la-rarete-de-certains-metaux-peut-elle-freiner-le-developpement-des-energies-renouvelables>
16. ↑ *Développement mondial de l'éolien et criticité des matières premières*. B. Multon. Echosciences. 2019. <https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/xcx>