

**RECYCLAGE ET VALORISATION DES COMPOSANTS
D'EOLIENNES**

ETAT DE L'ART TECHNICO-ECONOMIQUE ET PERSPECTIVES

RAPPORT FINAL

Mai 2024

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Recyclage et valorisation des composants d'éoliennes. Etat de l'art technico-économique et perspectives, 2024, 186 p, n°22-0923/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

Comité de suivi de l'étude :

Fabrice Abraham – Renault, Gérard Antonini – RECORD, Tatiana Bratec – Engie, Raphaël Breton-Godo - Total Energies, Magali Collin - Total Energies, Coryse Coudray – EDF, Bénédicte Couffignal – RECORD, Bruno Daille-Lefèvre – INRS, Stéphane Dercourt - Séché Environnement, Frank Despinois - Total Energies, Adeline Élisabeth-Mesnager - Suez Recyclage et Valorisation France, Paul Franc – ADEME, Tiphany Genin - ministère de la Transition écologique, Anne Grau – EDF, Ronan Guermeur – Suez, Mary Hanhoun – Engie, Marie Keller - Veolia North America, Ronan Levilly – INRS, Doris Nicklaus - Ministère de la Transition écologique, Sven Saura et Augustin Liebault – Veolia, Pierre Stephan – EDF, Violaine Tarizzo - Ministère de la Transition écologique, Ghislain van den Broek d'Obrenan – Paprec, Marie Wouts - Engie

© RECORD, 2024

RÉSUMÉ

En 2024, plus de 9 500 éoliennes terrestres et maritimes sont installées en France. Certains parcs éoliens terrestres français sont arrivés en fin de vie (fin de vie technique ou économique, repowering) et une augmentation massive des opérations de démantèlement est attendue à partir de 2025, générant d'importants flux de matières sortant des parcs mis hors service. Se pose alors la question de la gestion et du devenir des éoliennes démantelées : réemploi, réutilisation, recyclage et valorisation des composants et matériaux font partie des solutions — outre l'élimination. Si certains matériaux issus des éoliennes sont recyclables et valorisables en quasi-totalité dans les filières françaises existantes, plusieurs obstacles demeurent s'agissant du recyclage des pales, à base de matériaux composites, et du recyclage des aimants permanents, contenant des terres rares.

Cette étude réalise un état des lieux du développement dans le monde des technologies de recyclage et de valorisation des différents composants d'éoliennes.

Dans un premier temps, un état de l'art technico-économique de la filière de fin de vie des éoliennes est réalisé en France, en Europe (Allemagne, Pays-Bas, Danemark, etc.) et à l'échelle mondiale (essentiellement États-Unis). Cet état de l'art examine différentes dimensions : gisements et devenir des éoliennes, dispositifs législatifs et réglementaires, chaîne de valeur de la filière, aspects opérationnels et techniques autour du démantèlement et des opérations de tri, transport et logistique post-démantèlement, technologies et procédés de recyclage et de valorisation des pales déjà opérationnels (recyclage mécanique, chimique par pyrolyse, chimique par solvolyse, valorisation énergétique/matière comme combustibles solides de récupération, incinération), viabilité économique.

Dans un second temps, pour les pales et les aimants permanents, sont examinées les évolutions possibles s'agissant d'une part des procédés et technologies de recyclage et, d'autre part, de la mise en œuvre de matériaux innovants et écoconçus. Pour les pales, des procédés inédits, non encore matures, ont été décrits (gazéification par lit fluidisé, pyrolyse assistée par micro-ondes, courants électriques pulsés, pyrolyse par plasma, vapopyrolyse/vapothermolysse, solvolysse hautes ou basses température et pression), ainsi que des matériaux nouveaux (résine thermoplastique Elium et projet ZEBRA, RecyclableBlade, vitrimères, polymères autorenforcés). Pour les aimants permanents, des procédés ont également été décrits (réutilisation directe, recyclage en boucle courte magnet-to-magnet, recyclage en boucle longue aboutissant à l'extraction des terres rares par voie chimique — les deux derniers procédés sont non matures), ainsi que des travaux encore au stade de la recherche sur l'opportunité de remplacer les terres rares ou d'en réduire la teneur.

MOTS CLÉS

Fin de vie, éolienne, gisement, démantèlement, réemploi, réutilisation, recyclage, valorisation, élimination, pale, matériaux composites, aimant permanent, aimant, terres rares, réglementation

SUMMARY

More than 9,500 onshore and maritime wind turbines are installed in France. Some French onshore wind farms have reached the end of their life (end of technical or economic life, repowering) and a massive increase in dismantling operations is expected from 2025, generating significant flows of materials. The question then arises of the management and future of dismantled wind turbines: reuse, recycling and recovery of components and materials are part of the solutions — in addition to elimination. Although certain materials from wind turbines are almost entirely recyclable and recoverable in existing sectors, several obstacles remain when it comes to the recycling of blades, based on composite materials, and the recycling of permanent magnets, containing rare earths.

This study provides an overview of the development in the world of recycling and recovery technologies for different wind turbine components.

Firstly, a state of the technico-economic art of the wind turbine end-of-life sector is carried out in France, in Europe (Germany, Netherlands, Denmark, etc.) and on a global scale (mainly USA). This state of the art examines different dimensions: deposits and future of wind turbines, legislative and regulatory systems, value chain of the sector, operational and technical aspects around dismantling and sorting operations, transport and post-dismantling logistics, technologies and recycling and recovery processes for blades already operational (mechanical recycling, chemical recycling by pyrolysis, chemical recycling by solvolysis, energy/material recovery as solid recovered fuels, incineration), economic viability.

Secondly, for blades and permanent magnets, possible developments are examined regarding, on the one hand, recycling processes and technologies and, on the other hand, the implementation of innovative and eco-designed materials. For blades, new processes, not yet mature, have been described (fluidized bed gasification, microwave-assisted pyrolysis, pulsed electric currents, plasma pyrolysis, vapopyrolysis/vapothermolysis, high or low temperature and pressure solvolysis), as well as new materials (Elium thermoplastic resin and ZEBRA project, RecyclableBlade, vitrimers, self-reinforced polymers). For permanent magnets, processes have also been described (direct reuse, short magnet-to-magnet loop recycling, long loop recycling leading to the extraction of rare earths by chemical means — the last two processes are not mature), as well as work still at the research stage on the possibility of replacing rare earths or reducing their content.

KEY WORDS

End of life, wind turbine, deposit, dismantling, reuse, recycling, recovery, elimination, blade, composite materials, permanent magnet, magnet, rare earths, regulations

SOMMAIRE

1 - État de l'art technico-économique (Étape 1)	5
1.1 - Situation en France	5
1.1.1 - Typologie et composition des éoliennes.....	5
1.1.3 - Devenir des éoliennes en fin de vie	34
1.1.4 - Réglementation relative à la fin de vie des éoliennes	41
1.1.5 - Chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes	48
1.1.6 - Opérations de démantèlement des éoliennes	53
1.1.7 - Tri, transport et logistique post-démantèlement.....	63
1.1.8 - Technologies et procédés de recyclage et valorisation.....	64
1.1.9 - Viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes	68
1.2 - Situation en Europe et dans le monde	70
1.2.1 - Choix des pays cibles.....	70
1.2.2 - Devenir des éoliennes en fin de vie	73
1.2.3 - Réglementation relative à la fin de vie des éoliennes	79
1.2.4 - Chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes	92
1.2.5 - Opérations de démantèlement des éoliennes	97
1.2.6 - Tri, transport et logistique post-démantèlement.....	107
1.2.7 - Technologies et procédés de recyclage et valorisation.....	108
1.2.8 - Viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes	123
2 - Perspectives d'évolution (Étape 2).....	124
2.1 - Les pales	124
2.1.1 - Méthodes et procédés de recyclage	124
2.1.2 - Matériaux	152
2.2 - Les aimants permanents	161
2.2.1 - Méthodes et procédés de recyclage	161
2.2.2 - Matériaux	170
3 - Conclusions et restitution des travaux (Étape 3)	176
3.1 - Synthèse conclusive et perspectives	176
4 - Annexe	181
4.1 - Note du CEA-Liten à la mission du CGEDD/CGEIET (recyclage des aimants) ...	181
4.3 - Pool d'experts	185

1 - État de l'art technico-économique (Étape 1)

Cette étape vise à réaliser un état de l'art technico-économique de la filière de fin de vie des éoliennes, à l'échelle mondiale (France, Europe, monde).

Cet état de l'art revêt différentes dimensions (technique ou technologique, industrielle, économique et financière, commerciale, réglementaire, politique, environnementale et sanitaire, etc.) et concerne différentes géographies (France, Europe, Amérique du Nord, Asie, etc.).

La situation en France est traitée dans une première partie, par l'examen méthodique de chacun de ces aspects. Dans une seconde partie, les résultats établis dans le cas de la France sont évalués comparativement (« benchmarkés ») avec les meilleures pratiques (« best practices ») identifiées dans d'autres pays particulièrement actifs sur la filière de fin de vie des éoliennes, et préalablement sélectionnés pour cette raison (investigations menées en Allemagne, au Danemark, aux Pays-Bas, en Espagne, etc. ; aux États-Unis et au Canada ; au Japon, en Chine, en Corée du Sud, en Inde, en Australie, etc.).

La réalisation de l'étape 1 s'appuie en particulier sur :

- la consultation de sources ouvertes : examen de tous documents et travaux disponibles dans la sphère publique — recherches Internet, études et rapports, extraction de bases de données de presse généraliste ou spécialisée, extraction de bases de données d'entreprises, sites de salons spécialisés, sites spécialisés, etc. ;
- l'analyse des sites Internet des acteurs identifiés ;
- des entretiens (téléphoniques ou par visioconférence) conduits auprès d'experts identifiés par les auteurs au cours de la mission.

1.1 - Situation en France

Dans cette partie, il s'agit de caractériser la filière de fin de vie des éoliennes en France, en renseignant divers éléments regroupés par Section qu'accompagne un paragraphe introductif.

1.1.1 - Typologie et composition des éoliennes

Cette partie vise à apporter des éléments de connaissance sur la typologie des éoliennes (éoliennes terrestres, éoliennes marines), ainsi qu'une description des différents composants constructifs d'une éolienne (par exemple fondations, massif, mât, turbine, pales, dimensions, etc.).

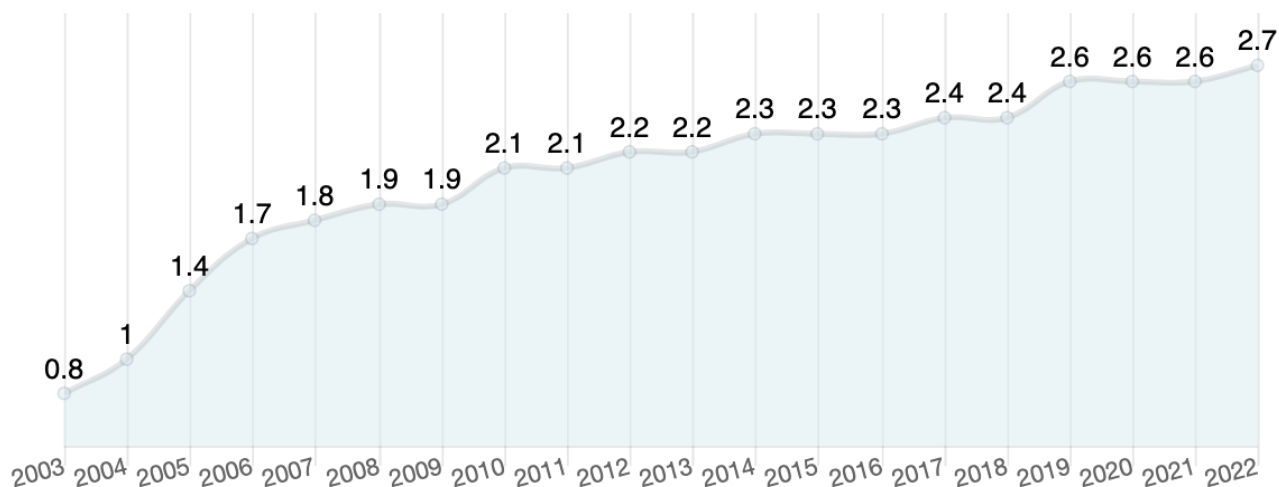
Le périmètre retenu est celui du « grand éolien » ou « éolien industriel », qui concerne des éoliennes à axe horizontal dont la puissance est supérieure ou égale à 250 kilowatts (kW) voire 1 mégawatt (MW). Toutefois, de par la spécificité des marchés (éolien terrestre, éolien en mer), cette limite peut être réhaussée : ainsi, pour le marché de l'éolien offshore, le grand éolien cible des éoliennes d'une puissance unitaire de plusieurs MW. L'électricité produite par ce type d'éoliennes est injectée dans le réseau électrique.

Éolien terrestre

La grande majorité des éoliennes installées en France sont des éoliennes tripales (3 pales orientables) à axe horizontal dotées d'une puissance moyenne unitaire de 2 à 3 MW (cf. [Le journal de l'éolien](#)). Les turbines proposées sur le marché se répartissent en deux grandes familles suivant l'architecture de leur génératrice électrique : d'une part les turbines équipées d'une génératrice asynchrone (environ 75 % du marché) et, d'autre part, celles équipées d'une génératrice synchrone (environ 25 % du marché — machines synchrones à aimants permanents). Les éoliennes à axe horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) sont de loin les plus répandues en Europe (meilleur rendement) mais d'autres configurations sont possibles avec les éoliennes à axe vertical [VAWT](#) (Vertical Axis Wind Turbine).

S'agissant de l'évolution des caractéristiques des machines, la hauteur moyenne des mâts installés en France a continuellement augmenté au cours des 20 dernières années, passant de 50 mètres au début des années 2000 à près de 100 mètres aujourd'hui. Le diamètre du rotor est également en augmentation, d'une part en raison d'une meilleure maîtrise des matériaux, d'autre part afin de pouvoir exploiter une plus grande variété de sites. Cette évolution de la hauteur du mât et du diamètre

du rotor ont conduit à une augmentation de la puissance des machines et de leur production. Ainsi les éoliennes installées en France sont passées d'une puissance de l'ordre de 1 MW dans la première partie des années 2000 à près de 3 MW (voire plus) en 2022 (cf. illustration ci-après).



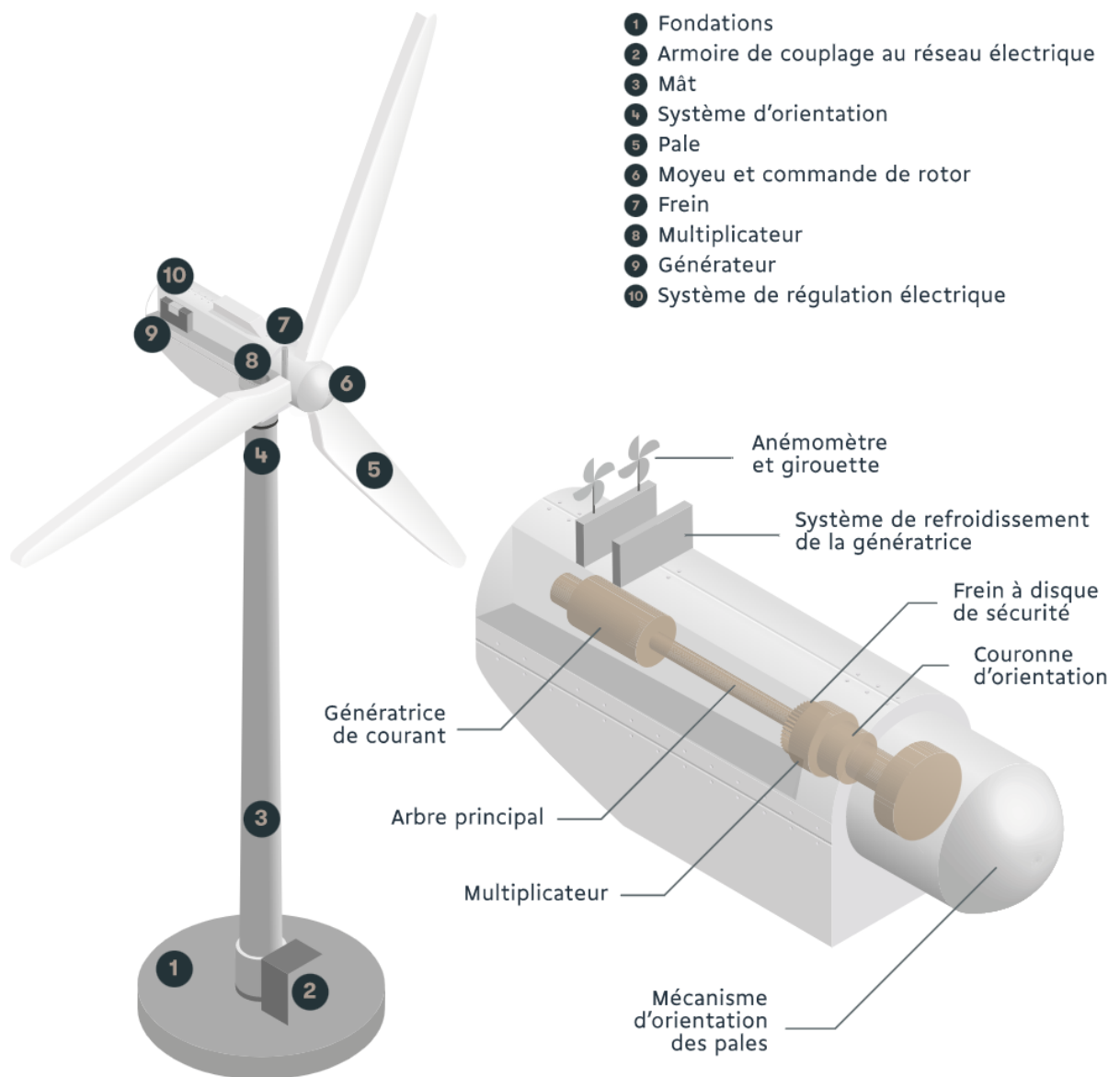
Puissance moyenne des machines installées chaque année, exprimée en MW (source : [Le journal de l'éolien](#), Observ'ER d'après [WindEurope](#), 2022).

Selon l'association France Énergie Éolienne (FEE — aujourd'hui [France Renouvelables](#)) au cours des dix dernières années, les éoliennes terrestres ont vu leur taille s'accroître de 17 % et leur capacité de production de 200 %. Toujours selon FEE ([Observatoire](#) de l'éolien 2022), 20 000 MW étaient installés en France au 30 juin 2022.

Typiquement, les éoliennes terrestres sont principalement composées des éléments suivants (partant du sol — cf. illustration ci-après) :

- de fondations de l'ouvrage, superficielle (embase poids avec ou sans renforcement du sol) ou profonde (sur pieux) à base de béton, granulats et armatures en fer (les fondations d'une éolienne de 3 MW représentent près de 500 tonnes de béton) ;
- d'une armoire de couplage de l'aérogénérateur au réseau électrique ;
- d'un mât tubulaire à base de plaques d'acier laminées soudées et de brides, supportant la nacelle¹ ;
- d'un système d'orientation par rapport au vent ;
- de pâles, creuses, en matériaux composites, qui forment le rotor (partie tournante de la turbine) avec le moyeu ;
- d'un moyeu (« nez » de l'éolienne), en acier, et d'une commande de rotor ;
- d'un système de freinage ;
- d'un multiplicateur (boîte de vitesse) ;
- d'un générateur électrique, qui convertit l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique ;
- d'un système de régulation électrique.

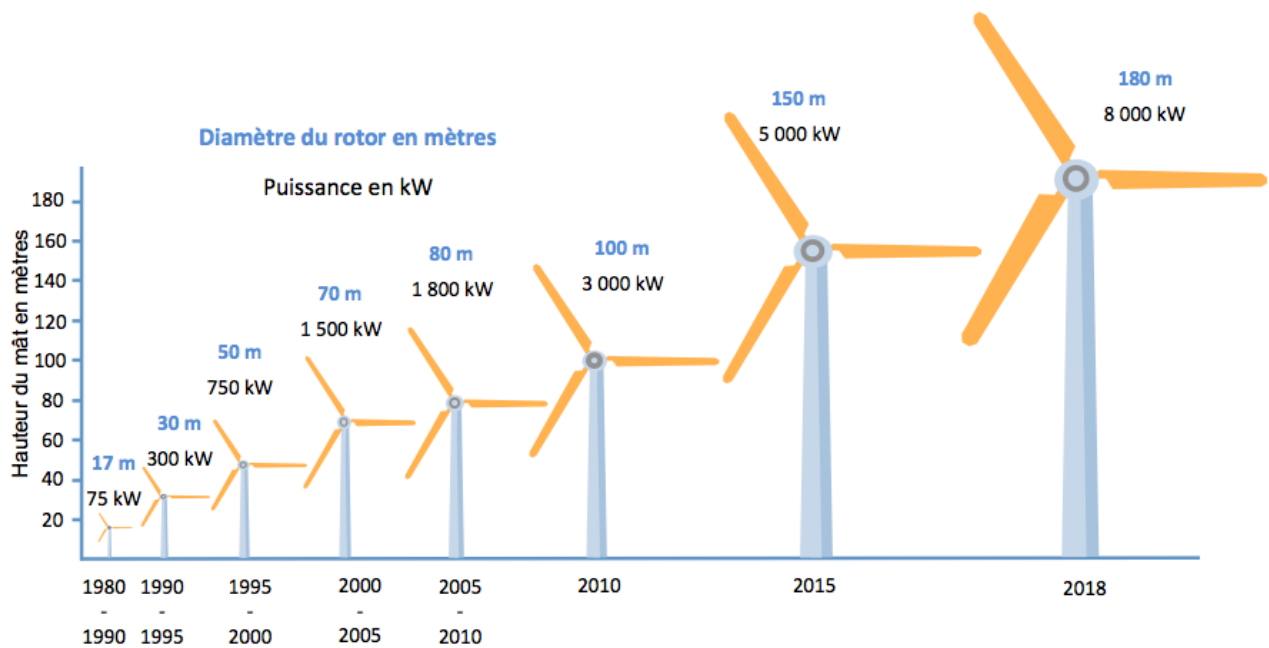
¹ La nacelle (habitacle) est un système électromécanique comprenant la boîte de vitesse, les arbres à basse et haute vitesse, le générateur, le contrôleur et les freins. Un anémomètre et une girouette sont montés sur la nacelle.



Composition d'une éolienne terrestre (source : France Énergie Éolienne, [FEE](#) — aujourd'hui [France Renouvelables](#), 2022).

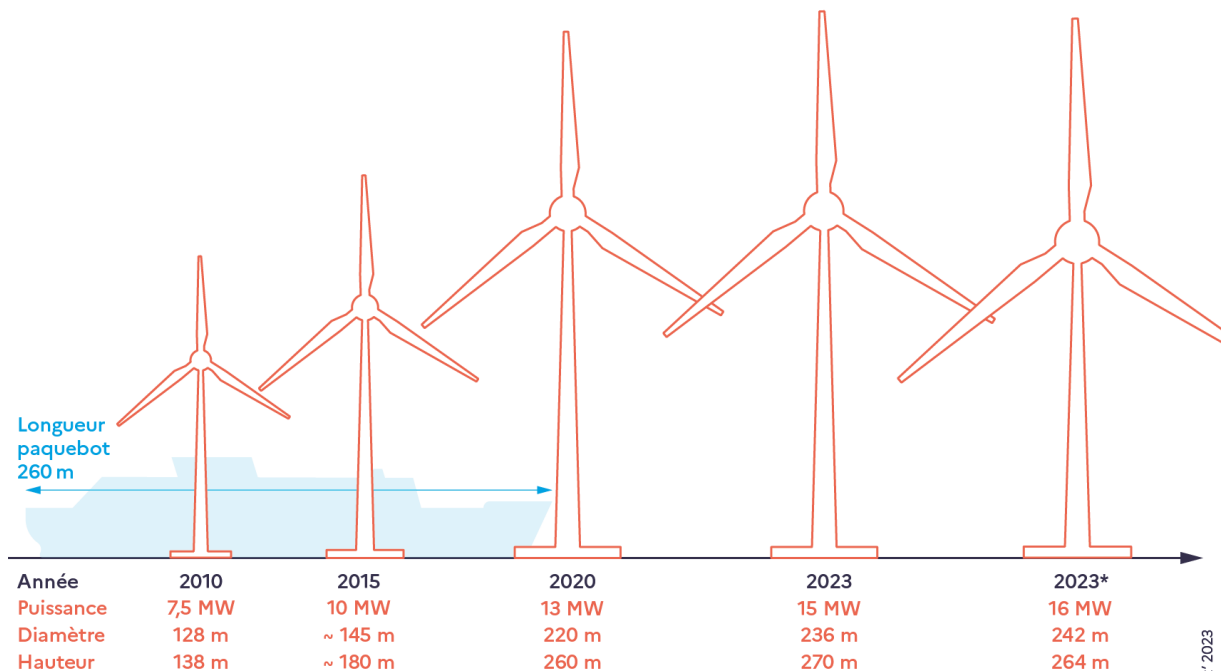
Éolien en mer

L'éolien en mer (offshore) est le domaine où le développement de la puissance des machines est le plus spectaculaire (cf. illustration ci-après).



Évolution de la puissance des éoliennes en mer (source : [Le journal de l'éolien](#), Observ'ER d'après [WindEurope](#), 2022).

Évolutions de la taille et de la puissance d'une éolienne posée en mer



*Les dimensions représentées correspondent à celles de la plus grande éolienne en service à ce jour : MingYang MySE16.0-242. Les perspectives d'évolution de puissance et de taille des éoliennes dans les années à venir restent difficilement prévisibles. Certains industriels ont d'ores et déjà annoncé en début d'année des éoliennes de 18 MW.

Source : Ministère de la Transition énergétique

Source : [Éoliennes en mer](#), 2023.

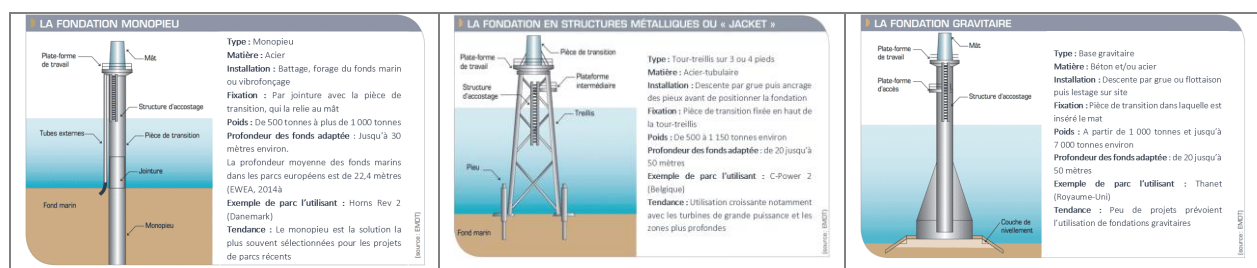
Selon Daniel Averbuch, ingénieur responsable du programme Éolien offshore et Énergies marines à [IFP Énergies nouvelles](#), « la puissance unitaire des éoliennes en mer est aujourd'hui de 10 MW, et l'industrie vise 15 MW et plus d'ici la fin de la décennie » — source : [Polytechnique-insights.com](#), janvier 2022).

En termes de puissance d'éolien en mer installée, les objectifs de l'association [FEE](#) s'élèvent à 18 GW en service en 2035.

Une différence majeure² entre des éoliennes terrestres et offshore réside dans les fondations³. Une éolienne en mer peut ainsi être installée de [deux façons](#) : sur une fondation qui repose sur les fonds marins (fondation dite « posée », « éolien posé »), ou sur une fondation flottante simplement reliée aux fonds marins par des lignes (câbles) d'ancrage (« éolien flottant »).

Les éoliennes en mer posées sont implantées sur des fondations directement fixées au plateau continental, à une profondeur maximum de 50 m et selon trois technologies (cf. illustration ci-après) :

- la fondation monopieu :
 - o adaptée à des fonds jusqu'à 30 mètres, l'enfoncement de la fondation dans le sous-sol lui permet de résister aux charges du vent, des marées et des vagues,
 - o simple de fabrication et d'installation, cette technologie représente plus de 90 % des éoliennes actuellement installées en mer ;
- la fondation en « jacket » :
 - o directement issu de l'industrie pétrolière offshore, ce type de fondation en structure métallique est indiqué pour des profondeurs allant de 20 à 50 mètres,
 - o cette technologie représente un peu moins de 10 % des éoliennes actuellement installées en mer, mais son utilisation est croissante, notamment avec l'augmentation de la puissance des turbines et l'exploitation de zones plus profondes ;
- la fondation gravitaire :
 - o d'une large base en acier ou en béton, cette fondation est conçue pour être placée sur le fond marin et suffisamment lourde pour rester en place même dans des conditions extrêmes,
 - o cette technologie est très peu utilisée (moins de 1 % des éoliennes en mer).



Les fondations de l'éolien posé (source : parc Éoliennes en Mer Dieppe Le Tréport, [EMDT](#) — voir également la fiche thématique [n° 9](#) annexée au « dossier du maître d'ouvrage » relatif au parc éolien en mer au large de la Normandie).

Au-delà de 50 mètres de profondeur, la technologie des éoliennes flottantes s'impose. Un des atouts de l'éolien flottant réside dans la possibilité d'un démantèlement complet des éoliennes en fin de vie, limitant ainsi l'impact environnemental. Trois concepts sont envisagés selon que l'installation repose sur (cf. illustration ci-après) :

- un seul flotteur sous forme d'une colonne verticale fortement ballastée — SPAR (Single Point Anchor Reservoir) — qui nécessite de gros volumes d'acier et une profondeur d'au moins 100 mètres sous l'éolienne ;
- une plateforme semi-submersible, constituée de plusieurs flotteurs et d'un ancrage gravitaire standard ;
- un flotteur de type TLP (Tension Leg Platform), caractérisé par un ancrage tendu à l'aide de câbles arrimés au fond marin.

² Voir cet [article](#) de l'Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) de l'U. S. Department of Energy pour un comparatif entre turbines terrestres à boîte de vitesse et éoliennes offshore à entraînement direct.

³ Cet [article](#) passe en revue les différents types de fondations mises en œuvre dans les éoliennes installées sur terre ou en mer (source : [E3S Web of Conferences](#), 2020).



Les fondations de l'éolien flottant (source : National Renewable Energy Laboratory, [NREL](#)).

Actuellement l'éolien en mer [posé](#) représente la quasi-totalité des énergies marines renouvelables en Europe et dans le monde. La filière française de l'éolien [flottant](#) fait l'objet de plusieurs projets de démonstrations et projets de fermes pré-commerciales et, depuis 2022, d'un appel d'offres (« [AO6](#) ») relatif à deux projets de parcs éoliens flottants en Méditerranée.

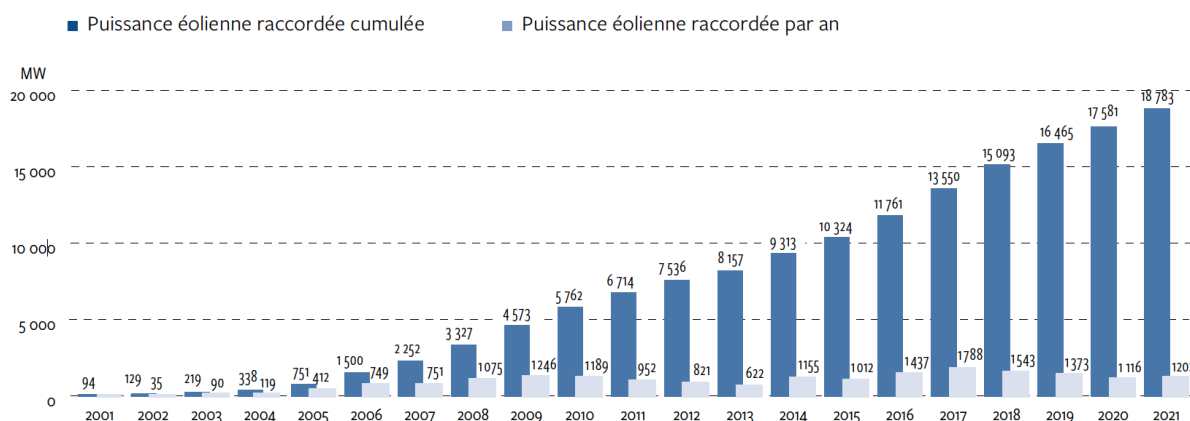
Enfin, pour une revue de la conception des éoliennes et de leurs différents éléments constitutifs (aérodynamique, contrôle de puissance et autres contrôles, taille des turbines, nacelle, pale, mât, connexion au réseau électrique, construction et fondations, coûts, diverses spécifications, etc.), voir cette page [Wikipédia](#), mise à jour à fin janvier 2023.

1.1.2 - Gisement des éoliennes en fin de vie

Cette partie vise à présenter toutes données disponibles et accessibles concernant la programmation en France du démantèlement du parc des éoliennes en fin de vie ou en repowering, en précisant les flux associés (t/an) et leurs évolutions à terme — ces données étant déterminantes pour évaluer le devenir et la rentabilité potentielle des filières de recyclage.

Le parc éolien français

La puissance installée en France est de près de 18,8 GW — 18 783 MW au 31 décembre 2021, comme l'indique ce [Panorama](#) de l'électricité renouvelable au 31 décembre 2021 — établi conjointement par l'agence [ORE](#) (Opérateurs de Réseaux d'Énergie), [Enedis](#) (gestionnaire du réseau de distribution d'électricité), [RTE](#) (Réseau de transport d'électricité) et le Syndicat des énergies renouvelables ([Ser](#)) — montrant l'évolution de la puissance éolienne raccordée au cours des 20 dernières années (cf. illustration ci-après et voir [ici](#) pour une actualisation : Tableau de bord : éolien, 3^e trimestre 2023).



Évolution de la puissance éolienne raccordée (source : [Panorama](#) de l'électricité renouvelable à fin 2021).

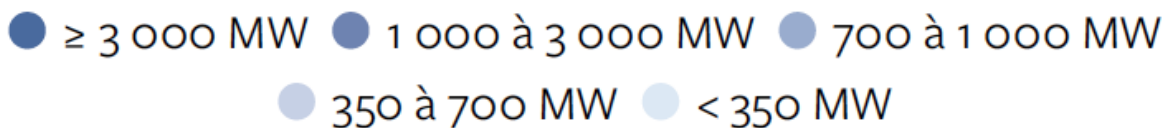
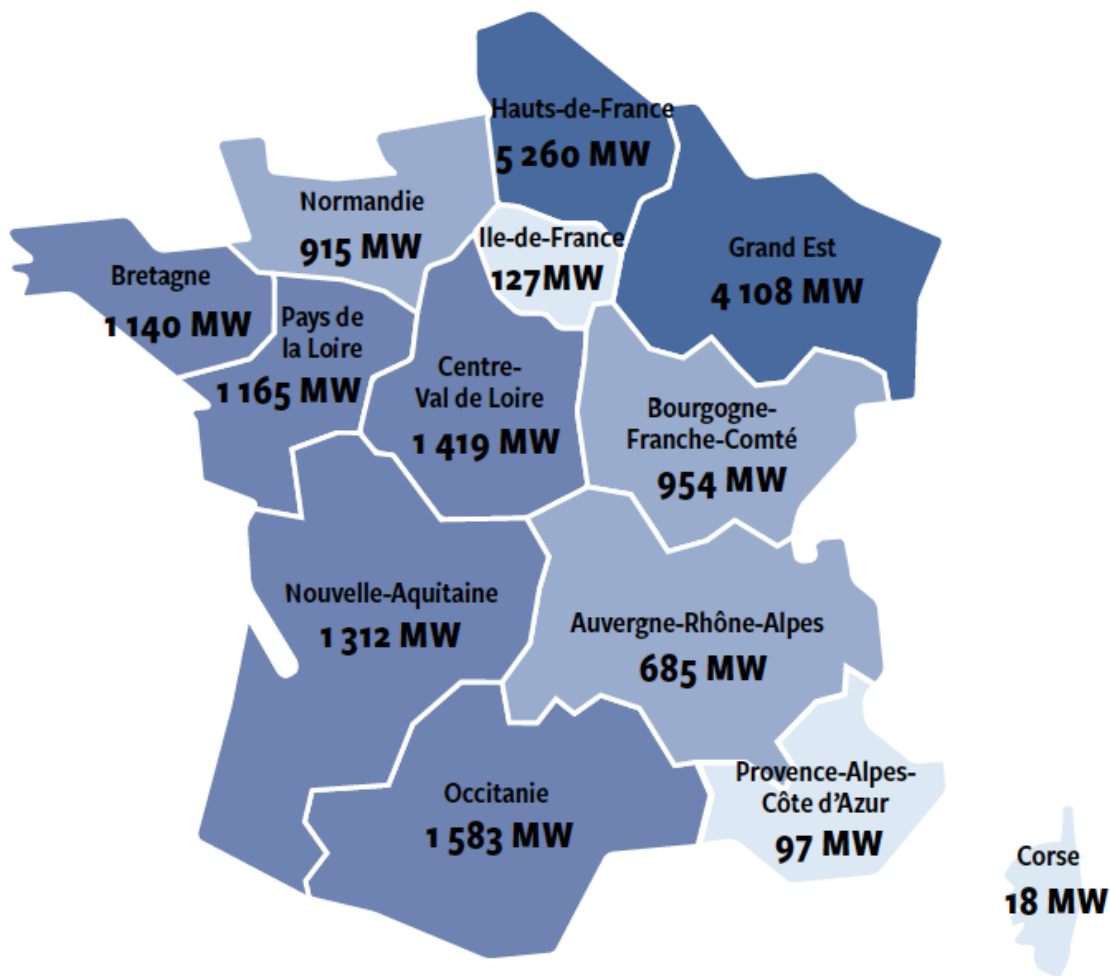
Cette puissance installée, qui atteignait en France 20 000 MW au 30 juin 2022, correspond à environ 9 000 éoliennes terrestres à fin 2021, réparties sur près de 1 400 parcs, comme le rapporte l'[Observatoire](#) de l'éolien 2022, réalisé par France énergie éolienne ([FEE](#)) en association avec [Capgemini Invent](#), et publié en septembre 2022. Voir [Observatoire de l'éolien 2023](#).

Il s'agit exclusivement d'éolien terrestre car les aérogénérateurs du parc éolien en mer de [Saint-Nazaire](#) — premier parc éolien en mer français en exploitation comprenant 80 éoliennes d'une puissance de 6 MW chacune, opérationnelles dès 2022 — ne produit de l'électricité que depuis juin 2022. Aux termes de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2019-2028), les objectifs de développement de la production d'électricité d'origine éolienne en France métropolitaine continentale à horizons 2023 et 2028 sont indiqués dans le tableau ci-après.

Puissance installée au 31 décembre (en GW)	2023	2028	
		Option basse	Option haute
Éolien terrestre	24,1	33,2	34,7
Éolien en mer	2,4	5,2	6,2

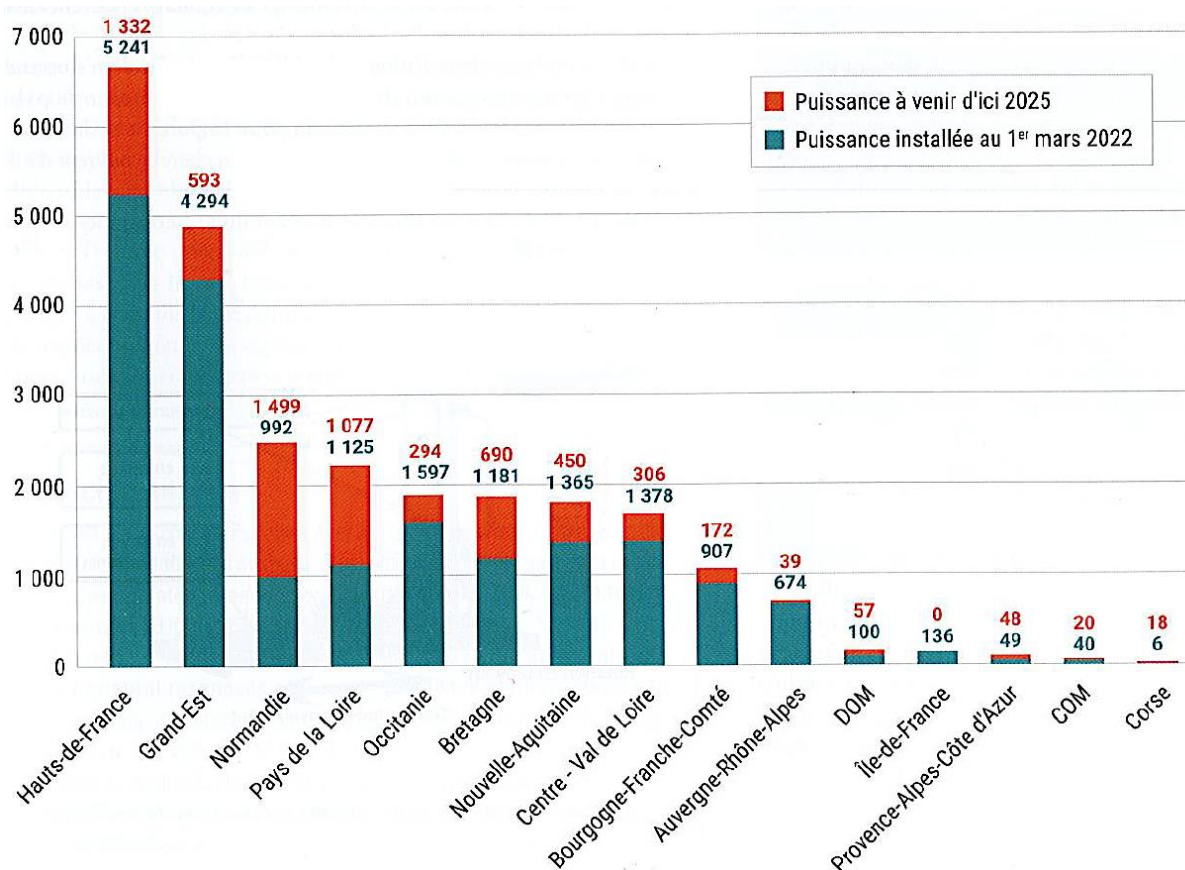
Les objectifs visés par la PPE (source : Décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie, [article 3](#)). À consulter également, cette [infographie](#) relative à l'évolution du parc éolien en France, réalisée par la Direction de l'information légale et administrative (Dila, Première ministre) à partir des données du Service des données et études statistiques (SDES), d'après Enedis, RTE et la CRE.

Le parc éolien (terrestre) français est concentré à 60 % sur trois grandes régions : les Hauts-de-France, le Grand-Est et l'Occitanie (cf. France Énergie Éolienne, [FEE](#), et illustration ci-après).



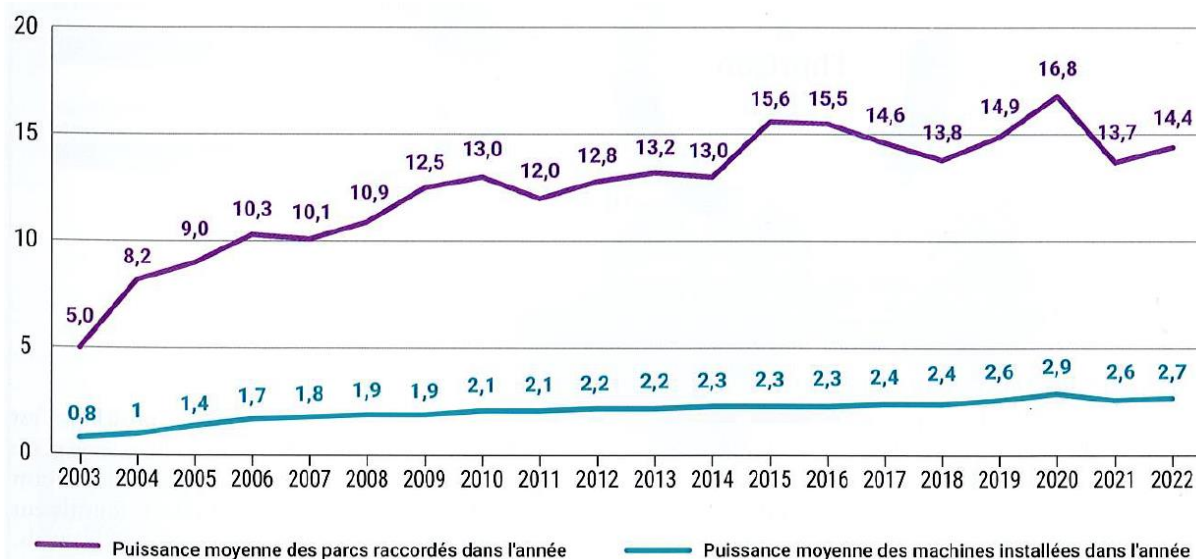
Puissance éolienne installée par région au 31 décembre 2021 (source : [Panorama](#) de l'électricité renouvelable à fin 2021). Voir le [Panorama](#) de l'électricité renouvelable 31 décembre 2022.

Outre les Hauts-de-France et le Grand Est, on observe à l'horizon 2025 une forte montée en puissance de la Normandie et des Pays de la Loire (également de la Bretagne quoique dans une moindre mesure), principalement liée à la mise en service des parcs éoliens offshore (cf. illustration ci-après). L'illustration est tirée de cet [Atlas 2022](#) — aimablement communiqué par Paul Franc de l'Ademe — des parcs éoliens (terrestres, offshore) en France, publié dans un cahier spécial par Le Journal de l'Éolien n°46 en avril-mai-juin 2022 (Le Journal de l'Éolien est édité par l'[Observ'ER](#) — Observatoire des Énergies Renouvelables). Cet atlas est le fruit d'une enquête menée par l'Observ'ER de janvier à mars 2022 auprès de l'ensemble des exploitants et développeurs de sites éoliens sur le territoire français — un exercice réalisé par Observ'ER depuis seize ans.



Puissance (MW) raccordée et en projet par région (source : [Observ'ER](#), Le Journal de l'Éolien n°46, 2022).

En vingt ans, la puissance moyenne des machines installées annuellement a pratiquement triplé (cf. illustration ci-après). Certains parcs sont équipés avec des machines d'une puissance unitaire dépassant les 4 MW. La puissance moyenne des parcs raccordés chaque année est légèrement orienté à la baisse depuis quelques années : les puissances moyennes des parcs en repowering pourraient confirmer cette baisse dans le futur en raison de diverses contraintes (hauteur des mâts, etc.).

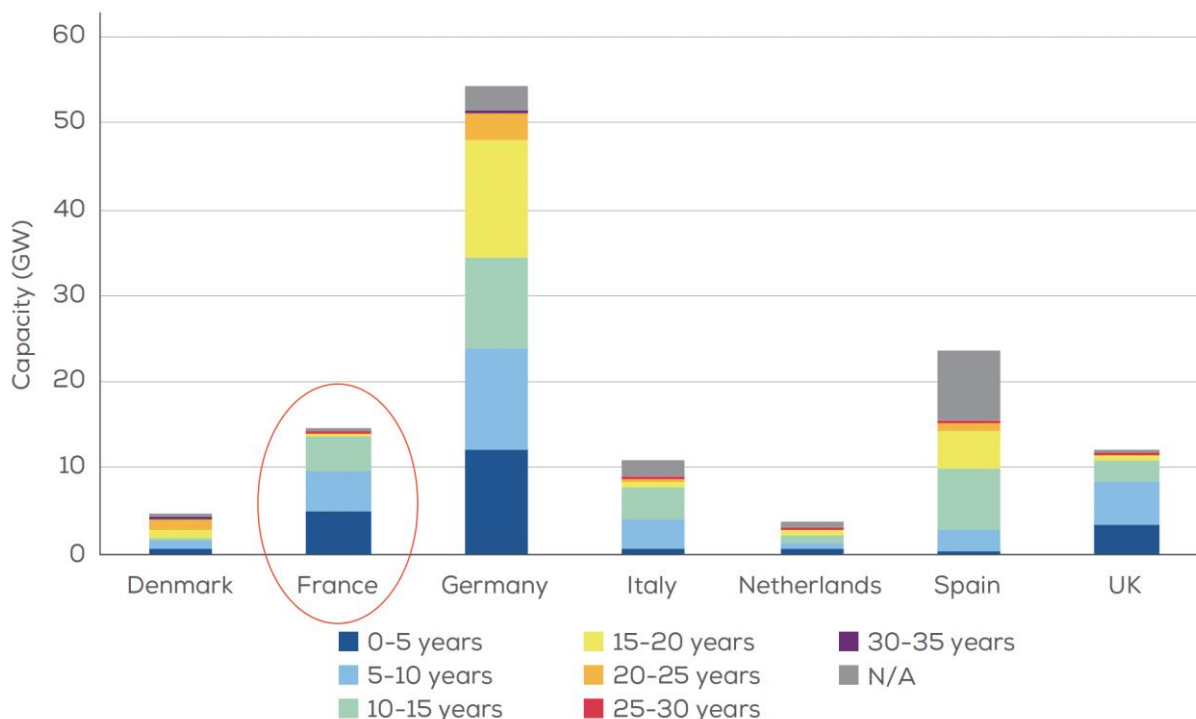


Puissance moyenne (MW) des machines installées et des parcs connectés annuellement, entre 2003 et 2022 (source : [Observ'ER](#), Le Journal de l'Éolien n°46, 2022).

En 2022, le parc éolien français compte 8 000 à 8 500 éoliennes terrestres (voire 9 000 — cf. ci-dessus), un chiffre qui devrait évoluer vers 14 500 mâts en 2028 — soit une augmentation de 6 500

mâts — pour atteindre les objectifs de la PPE (cf. tableau ci-dessus). La PPE ([synthèse](#)) précise que « le développement de l'éolien se fera en partie par des rénovations de parcs existants arrivant en fin de vie, ce qui permet d'augmenter l'énergie produite tout en conservant un nombre de mâts identique ou inférieur ».

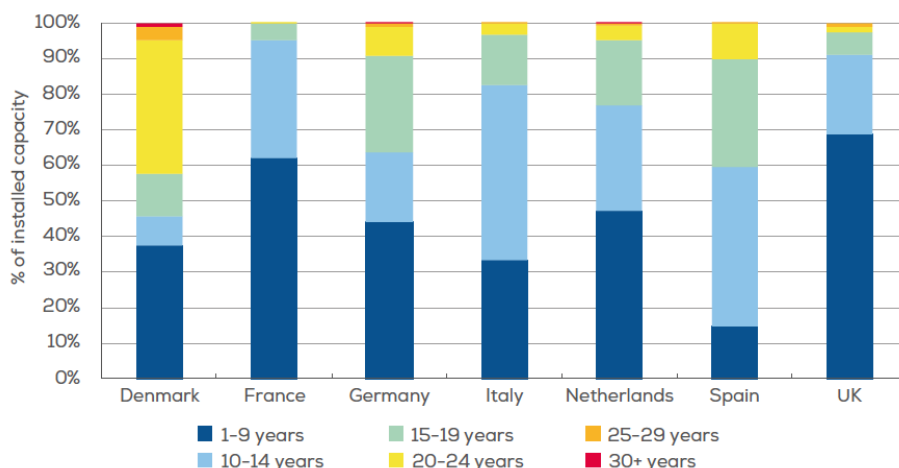
La figure ci-après — tirée de cette [étude](#) publiée en mai 2020 conjointement par le Conseil européen de l'industrie chimique [Cefic](#) (anciennement Conseil européen des fédérations de l'industrie chimique), l'Association européenne de l'industrie des composites [EuCIA](#) (European Composites Industry Association) et l'Association européenne de l'énergie éolienne [WindEurope](#), relative à l'accélération de la transition de l'industrie éolienne vers une économie circulaire en matière de recyclage des pales — présente l'âge du parc éolien terrestre français, comparé à celui de six autres pays européens. Le parc français est l'un des plus jeune d'Europe. Le Danemark, l'Allemagne, l'Espagne et les Pays-Bas sont les marchés les plus matures.



Âge du parc éolien français (source : [Cefic-EuCIA-WindEurope](#), 2020).

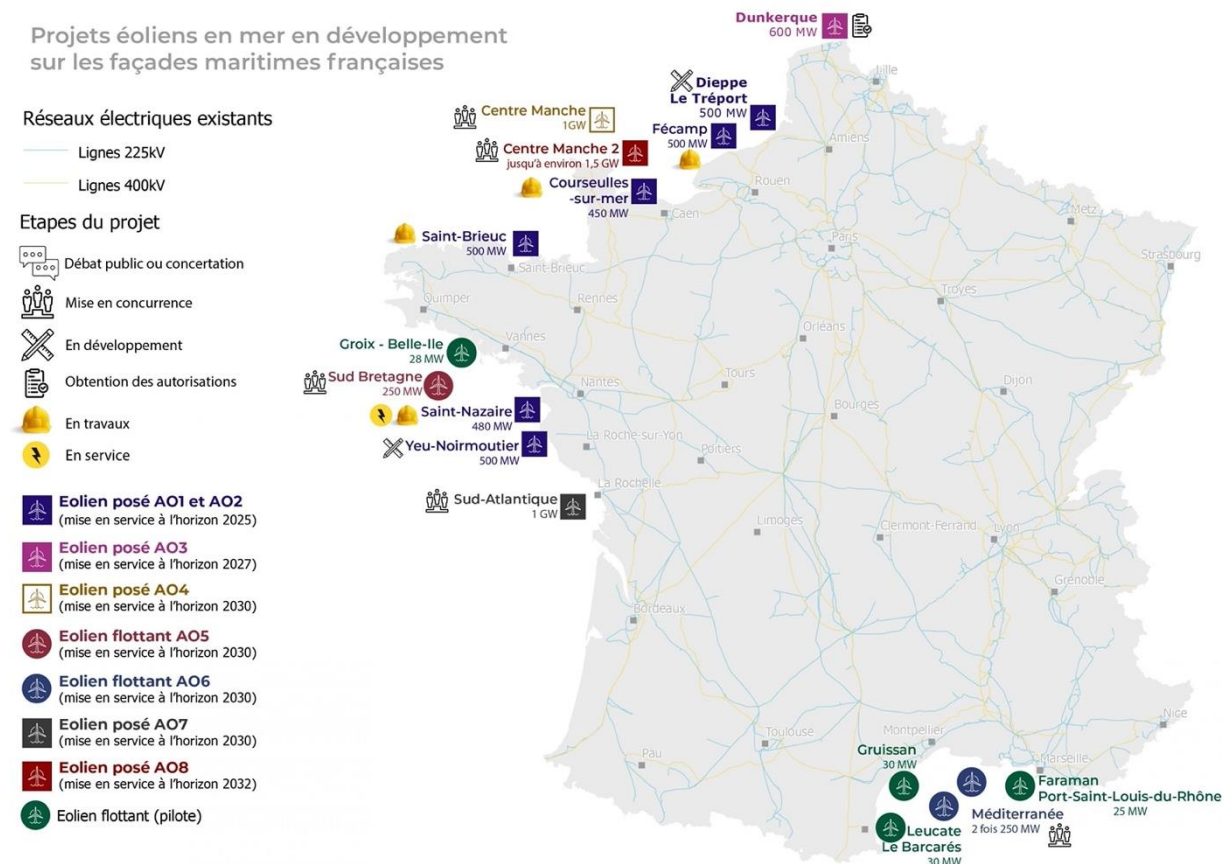
Ces données sont à mettre en perspective avec le tableau ci-après, tiré de ce [rapport](#) publié par WindEurope en novembre 2020 sur le démantèlement des éoliennes terrestres, et qui montre la répartition par âge de la capacité éolienne terrestre dans sept pays européens.

Age distribution of onshore wind capacity in seven European countries



Répartition par âge (exprimée en % de la capacité installée) de la capacité éolienne terrestre en Europe (source : [WindEurope](#), 2020).

L'état du développement de l'éolien offshore en France (parcs et projets) est présenté de façon détaillée et régulièrement actualisé sur ce [site](#) du ministère de la Transition écologique, selon quatre grandes façades maritimes (cf. cartographie ci-après).



Carte des parcs et projets éoliens en mer en France (source : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, [Cerema](#), 2022).

Les parcs en fin de vie

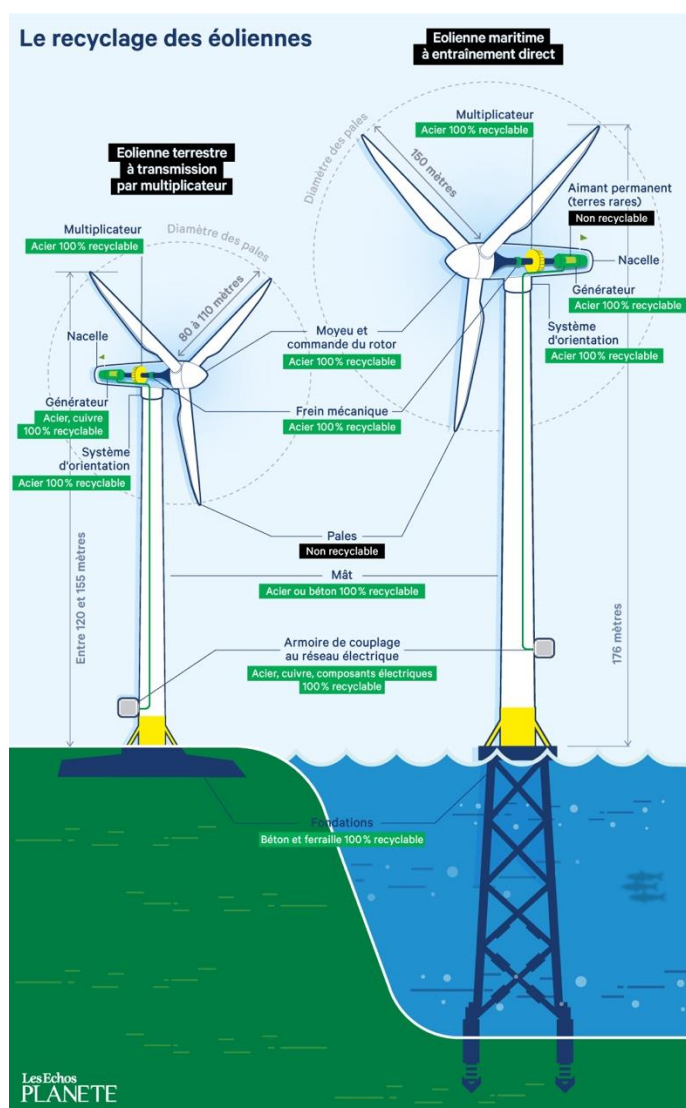
En France, le premier démantèlement d'un parc éolien — terrestre — a eu lieu en avril 2010 et a été opéré par [Cegelec](#) Global Systems & Services (exploitation et maintenance industrielle) du groupe Vinci Energies. L'entreprise a ainsi effectué le démontage des dix éoliennes du site de Sallèles-Limousis, près de Carcassonne (Aude, Occitanie). L'opération a été suivie du démontage de l'ensemble des équipements techniques, de l'arasement des fondations et de la revégétalisation du site. L'entité Global Systems & Services de Cegelec a aujourd'hui disparu. Et pour l'éolien marin, selon cet [article](#) paru le 21 février 2022 dans Les Échos Planète, seulement trois parcs éoliens marins — de taille modeste — ont été démantelés en Europe, dont celui d'Yttre Stengrund en Suède, concernant cinq aérogénérateurs de 2 MW opérés par Vattenfall, a ainsi été démantelé en 2016, laissant une partie de ses fondations dans le sol marin.

Selon Vincent Guénard, animateur pôle Éolien et Énergies marines, service Réseaux et Énergies renouvelables de l'Ademe, la durée de vie moyenne d'une éolienne terrestre est de 15 à 25 ans, tandis que celle d'une éolienne offshore est de 20 à 30 ans — les aérogénérateurs marins, conçus pour des environnements plus agressifs et plus corrosifs, étant plus robustes.

À fin 2022, moins de 30 (26 ?) parcs éoliens avaient été démantelés, représentant 190 éoliennes et 200 MW — selon Vincent Guénard. Selon cet expert, il n'existe pas en France à proprement parler de « programmation » du démantèlement des éoliennes (fin de vie ou repowering), ces opérations se faisant au cas par cas, en fonction de la stratégie de l'exploitant (cf. infra).

À partir de 2025, avec l'arrivée en fin de vie de centaines d'aérogénérateurs (terrestres), l'Ademe prévoit le démantèlement de 1 GW d'éoliennes par an, soit l'équivalent de près de trois-cents

éoliennes de 3,6 MW (un modèle courant) qui représentent des millions de tonnes de matériaux à traiter (une éolienne de puissance moyenne de 3,6 MW pèse environ 1 500 tonnes — soit ~ 450 000 tonnes de matériaux à traiter annuellement) au cours de la décennie — selon Vincent Guénard, cité dans cet [article](#) paru le 21 février 2022 dans Les Échos Planète. La masse d'une telle machine se répartit essentiellement entre ses fondations en béton (environ 1 000 tonnes) et son mât en acier et/ou en béton (450 tonnes). Ces deux matériaux (acier, béton) sont très faciles à recycler : l'acier est recyclable en totalité et indéfiniment, le béton se réemploie notamment sous forme de granulats ou dans la fabrication de béton neuf. Les autres matériaux présents dans l'éolienne se concentrent dans le rotor (moyeu, en fonte recyclable, et pales, en matériaux composites) et la nacelle (matériaux recyclables, en particulier acier, cuivre, matériaux électriques et électroniques, etc.). Les pales contribuent pour 6 à 8 % du poids total de l'éolienne (hors fondations ; en comptant les fondations, les composites représentent autour de 2 % de la masse totale) — représentant 3 000 à 15 000 tonnes de déchets annuels en France à partir de 2025, selon Vincent Guénard. Les éoliennes fonctionnant grâce à des alternateurs à multiplicateur (boîte de vitesse) ne contiennent pas de matériaux particulièrement difficiles à traiter, au contraire de celles qui recourent à une technologie dite à entraînement direct (moins de 10 % des éoliennes terrestres mais majorité des éoliennes offshore) avec aimant permanent à base de terres rares (cf. illustration ci-après).



Les principaux matériaux entrant dans la composition des éoliennes (source : [Les Échos Planète](#), 2022).

En bref, sur le sujet particulier des terres rares, selon cet [avis technique](#) de l'Ademe, rendu en octobre 2020, relatif aux *Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie*, seules 6,2 % (au 31 décembre 2019) des éoliennes terrestres françaises recourent à la technologie à entraînement direct avec aimants permanents, soit 372 tonnes d'aimants permanents contenant 122 tonnes de néodyme

et 17 tonnes de dysprosium. En moyenne, il faut compter 638 kg d'aimants permanents par MW éolien, soit près de 2 tonnes pour une éolienne de 3,6 MW. Dans cet avis, l'Ademe souligne qu'outre l'existence de « contraintes d'équilibre économique » ou de « contraintes technologiques », le recyclage des terres rares est défavorisé par « un manque de gisement concentré de taille industrielle disponible à l'heure actuelle et sur au moins les deux décennies à venir qui permettrait d'envisager un déploiement économique des infrastructures de recyclage ». Dans cet autre [avis](#) de l'Ademe relatif à l'énergie éolienne terrestre et en mer, paru en mars 2022, l'Agence de la transition écologique rappelle que les éoliennes en mer contiennent des génératrices à aimants permanents pour réduire la masse des nacelles, les pièces mécaniques tournantes et les coûts d'exploitation (moindres besoins en maintenance). À l'horizon 2050, suivant les scénarios prospectifs de l'Ademe, le besoin français pour trois éléments (néodyme, praséodyme et dysprosium) pour 47 GW d'éolien en mer pourrait représenter 1,7 % de la production actuelle mondiale de ces éléments. 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 alternatives — cf. ce [feuilleton](#) de l'Ademe, paru en février 2022, sur les matériaux pour la transition énergétique. Des solutions de substitutions aux terres rares dans les aimants permanents sont envisagées (cf. Étape 2 - Perspectives d'évolution).

Pour l'éolien en mer — actuellement en plein [essor](#) — la question du démantèlement des parcs français est prématurée mais il est prévu, par exemple, que les fondations (gravitaires) du parc éolien en mer de [Fécamp](#) soient à terme intégralement retirées et recyclées alors que celles (fondations de type monopieu) du parc éolien de Courseulles-sur-mer (parc éolien en mer du [Calvados](#)) seront en partie laissées dans les fonds marins. Les difficultés relatives au démantèlement et au recyclage des éoliennes en mer, non seulement plus massives que les éoliennes terrestres, mais aussi implantées dans des environnements difficilement accessibles, sont connues mais encore très peu évoquées au niveau de la France — les premiers démantèlements de parcs éoliens marins n'interviendront qu'après 2040 en France, mais cette activité est déjà d'actualité dans d'autres géographies.

Selon le Syndicat des énergies renouvelables (Anne Georgelin, responsable éolien en mer — en 2024, chef de projets éoliens en mer à la DGEC), en matière d'éolien offshore, des objectifs de taux de recyclage ou de réutilisation des pales figurent désormais dans les cahiers des charges des appels d'offre — depuis l'AO4 (parc éolien en mer au large de la Normandie). En effet, le cahier des charges ([CDC A04](#)) relatif à la Procédure de mise en concurrence avec dialogue concurrentiel n° 1/2020 portant sur des installations éoliennes de production d'électricité en mer dans une zone au large de la Normandie, publié sur le site de la Commission de régulation de l'énergie (CRE), impose (critère de sélection et de notation des offres au titre de la prise en compte des enjeux environnementaux) un « taux de recyclage ou de réutilisation des pales d'éoliennes utilisées pour le projet », le taux de recyclage ou de réutilisation « sur lequel les candidats s'engagent dans leur offre » supérieur ou égal à 80 % (valeur « Rmin ») de la masse totale des pales recyclée ou réutilisée. Ainsi, lorsque le taux de recyclage ou de réutilisation R est égal à Rmin, la note (« NE3 ») est égale à 0 — celle-ci est maximale si R = 100 % (valeur « Rmax »). Le Candidat est par ailleurs tenu de « détailler dans son offre les filières de recyclage disponibles à la date de remise de l'offre », de « présenter ses hypothèses d'évolution des différentes filières de façon à justifier le taux indiqué dans son offre », ainsi que de préciser d'éventuels contraintes ou verrous et présenter les partenariats conclus ou envisagés (recyclage ou réutilisation). Une sanction financière est prévue en cas de non-respect des engagements relatifs au taux de recyclage ou de réutilisation.

Le ministère de la Transition écologique (CGEDD⁴/CGEIET⁵) a publié en mai 2019, un [rapport](#) sur les conditions d'émergence d'une *Économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France*. Cette étude — dont le périmètre géographique est principalement circonscrit à celui de la France et la portée limitée au parc éolien terrestre — examine en premier lieu le cadre réglementaire en vigueur (chapitre I). L'étude du CGEDD/CGEIET propose également (chapitre II) une estimation sur les vingt prochaines années des flux des différents matériaux issus du démantèlement des parcs éoliens terrestres, en s'appuyant notamment sur une [étude](#) de l'Ademe de mai 2015 relative à l'*Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien*. Les autres volets traités par l'étude du CGEDD/CGEIET portent sur les enjeux de la fin de vie des éoliennes et le positionnement des acteurs (cf. chapitre III), sur l'économie générale des filières de traitement des éoliennes en fin de vie (chapitre IV), ainsi que sur la recherche et développement en matière de recyclage des pales et des aimants permanent des éoliennes (chapitre V).

⁴ Le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) est devenu l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD) en 2022.

⁵ Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies.

Selon Camille Charpiat (responsable éolien terrestre) du Syndicat des énergies renouvelables (Ser), les données de l'étude du CGEDD/CGEIET proviendraient pour une bonne part du Ser et de ses adhérents — le Ser ne prévoit pas une mise à jour prochaine de ces données. Cité dans cet [article](#) d'Environnement Magazine (n° 1793, janvier 2022), le Syndicat des énergies renouvelables estimait qu'en 2025, 400 à 600 éoliennes seraient démantelées chaque année, contre une centaine à la date de l'interview. Et dans cet autre [article](#) du 15 octobre 2021, Camille Charpiat estimait entre 300 à 500 le nombre d'éoliennes à démanteler annuellement en France entre 2025 et 2030, en tablant sur une durée de vie de 20 à 25 ans.

Pour mémoire, l'étude Ademe de 2015 visait à estimer dans quelle mesure l'économie circulaire représente une opportunité pour le secteur de l'éolien. Partant d'un panorama des enjeux de l'économie circulaire pour la filière, en se fondant sur une analyse des flux (flux matière, flux logistique, flux de service) liés au secteur éolien, l'étude identifiait dans un second temps les opportunités stratégiques susceptibles de répondre à ces enjeux. Six de ces opportunités (sur un total de 17) ont été étudiées plus en détail afin d'évaluer les bénéfices associés et analyser les freins à leur mise en œuvre, à savoir :

- structurer une filière pour le recyclage des pales ;
- favoriser le modèle d'affaire de l'extension de la durée de vie des éoliennes ;
- favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de reconditionnement et de maintenance ;
- pérenniser les plateformes de fabrication de l'éolien en mer par l'activité de démantèlement ;
- augmenter la capacité de production de mâts d'éoliennes en France pour favoriser les achats locaux ;
- faire émerger un ensemble français sur l'éolien terrestre pour optimiser la chaîne de valeur des flux.

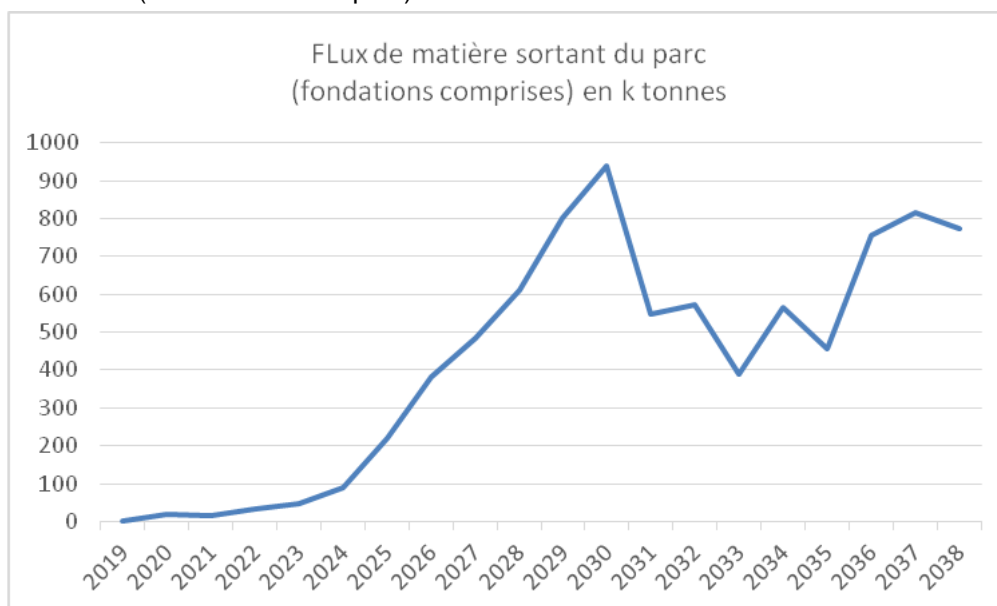
À toutes fins utiles (suivi de la thématique au sein des ministères, mise à jour des données, sollicitation d'experts, etc.), les auteurs du rapport de 2019 (Sylvie Alexandre, Philippe Follenfant et Benoît Legait) ont été contactés par les auteurs dans le cadre de la présente étude RECORD. Madame Alexandre et monsieur Legait sont aujourd'hui en retraite. Monsieur Follenfant (toujours en poste) renvoie vers Messieurs Vincent Coissard (Direction générale de la prévention des risques - DGPR) et Vincent Delporte (Direction générale de l'énergie et du climat - DGEC), comme étant « les deux personnes les plus directement concernées » par le sujet — Messieurs Coissard et Delporte sont cités en Annexe 3 du rapport de 2019, au titre des personnes rencontrées ou interrogées. Contactés, Messieurs Coissard et Delporte n'ont pas donné suite aux sollicitations des auteurs — une information recherchée en particulier est liée à la recommandation n° 4 du rapport de 2019, stipulant de « faire tenir par exemple par le CGDD (Commissariat général au développement durable) un tableau de bord de la fin de vie des parcs, retraçant en particulier les flux de matières à partir des informations détenues par les préfets »⁶.

Le rapport du CGEDD/CGEIET propose une estimation sur 20 ans des flux des différents matériaux susceptibles de sortir des parcs éoliens en fin de vie. Ces flux, fonction de la puissance installée au fil du temps et de la durée de vie des éoliennes, ne deviennent significatifs qu'à partir de 2025 ; ils passent par un maximum en 2030, puis diminuent de moitié en trois ans avant d'augmenter de nouveau et de retrouver en 2037 pratiquement le niveau de 2030. Quantitativement, le béton issu des fondations représente la masse la plus importante, jusqu'à trois fois celle de l'aérogénérateur proprement dit.

À noter que les [transferts transfrontaliers](#) de déchets sont strictement réglementés — prescriptions du règlement européen n° 1013/2006 du 14 juin 2006, intégrant en droit communautaire les dispositions de la convention de Bâle du 22 mars 1989. Le règlement européen n° 660/2014 du 15 mai 2014 sur les transferts transfrontaliers des déchets modifie le règlement n° 1013/2006 : entré en vigueur le 17 juillet 2015, et mis en application le 1^{er} janvier 2016, il vise notamment à renforcer la lutte contre les transferts illicites de déchets avec la modification de son article 50 sur les plans d'inspection. Les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET notent qu'aucun transfert transfrontalier de déchets de parcs éoliens n'a été constaté depuis 2016, ni à l'import ni à l'export.

⁶ Dans un e-mail du 09/03/2023, Doris Nicklaus (ministère de la Transition écologique) indique que « des obligations déclaratives ont été mises en place dans l'arrêté ministériel de prescriptions générales pour alimenter la base de données [OREOL](#) », une plateforme « accessible aux exploitants et à l'administration ». OREOL est « relié à [Géorisques](#) qui permet au public d'accéder à la plupart des données renseignées dans OREOL telles que les différentes dates clés d'un parc, dont la date de démarrage du chantier de démantèlement » — mais absence d'informations sur les flux de matières.

En tablant sur une durée de vie moyenne des parcs éoliens de vingt ans, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET proposent une quantification des flux de matériaux issus du démantèlement des parcs éoliens, distinguant ceux produits par l'aérogénérateur proprement dit de ceux issus des fondations (cf. illustration ci-après).



Masse totale annuelle de matières issues du démantèlement des éoliennes terrestres, fondations comprises (source : [rapport](#) du CGEDD/CGEIET, 2019).

À partir des données de l'Ademe jusqu'en 2015, puis de celles de l'Observatoire des Énergies Renouvelables ([Observ'ER](#)) pour les parcs éoliens mis en place entre 2014 et 2018, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET ont complété l'évaluation des flux de matières issues du démantèlement des parcs éoliens (y compris les fondations) sur la période 2019-2038 (cf. illustration ci-après). Pour les aimants permanents, le flux est estimé à 36 tonnes en 2030 — soit un flux total de 330 tonnes sur la période 2019-2038. Pour le béton, les chiffres partent de l'hypothèse que les fondations sont totalement excavées. Et pour les autres matériaux du tableau, les flux cumulés sur la période 2019-2038 sont les suivantes (valeurs exprimées en milliers de tonnes) :

- béton : 6 447 ;
- acier : 1 546 ;
- fonte : 314 ;
- cuivre : 35 ;
- aluminium : 29 ;
- composite : 154.

Flux sortants en k tonnes	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
Béton	3	15	12	26	35	69	167	294	363	459	607	713	419	438	301	425	342	566	613	581
Acier	1	3	3	6	8	16	40	64	89	113	142	166	95	99	64	107	86	143	155	147
Fonte	0	1	1	1	2	3	8	13	19	24	31	36	21	22	14	20	16	27	29	27
Cuivre	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	3	4	3	3	1	2	2	3	3	3
Aluminium	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	3	2	2	2	2	1	2	3	2
Composite	0	0	0	1	1	2	4	7	9	12	15	17	10	10	7	10	8	13	14	14
Total	4	19	16	34	46	90	221	381	484	613	801	939	550	574	389	566	456	754	817	774

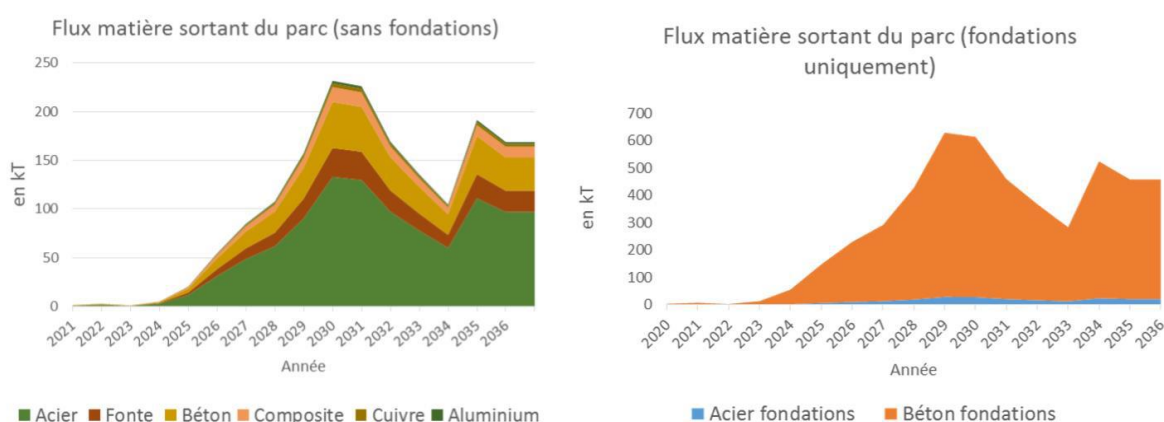
Flux sortants de matériaux, exprimés en milliers de tonnes (source : [rapport](#) du CGEDD/CGEIET, 2019).

Quelques remarques sur ces chiffres :

- les fondations (en béton armé) représentent les masses les plus importantes, près de 3 fois supérieures à celles de l'aérogénérateur ;
- les masses de composites représentent environ 2 % du total, fondations comprises ;

- environ la moitié de la masse de l'aérogénérateur est composée d'acier (dans le cas majoritaire des éoliennes avec mâts en acier) ;
- les flux matières sortant deviennent significatifs en 2024-2025, passant par un maximum en 2030, décroissant pendant 4 à 5 ans, augmentant de nouveau : ces variations sont dues à l'évolution des puissances installées 20 ans auparavant (cf. supra, à propos de l'évolution de la puissance éolienne raccordée) :
 - o la masse totale moyenne (fondations comprises) des éoliennes diminue de 624 t/MW avant 2015 à 486 t/MW après 2015, de sorte que la masse des matières produites en 2038 est inférieure à celle de 2030,
 - o pour les éoliennes de plus de 5 MW, on n'observe pas de diminution significative du poids de l'aérogénérateur (i. e. machine hors fondations) rapporté à la puissance unitaire par rapport aux éoliennes de faible puissance : valeurs comprises entre 60 et 80 t/MW.

Ces mêmes chiffres relatifs aux flux des matériaux issus des parcs sur la période 2020-2037 sont présentés sous une autre forme dans ce [document](#) de Sébastien Billeau, ingénieur à l'Ademe (cf. illustration ci-après).



Flux sortants, exprimés en milliers de tonnes (source : [présentation](#) de Sébastien Billeau le 12 mars 2020 à Berlin, lors d'une [conférence](#) organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie, en France et en Allemagne — dispositifs réglementaires en vigueur, retours d'expérience, aspects économiques, conception, etc. ; voir le [programme](#) de cette conférence).

À propos des terres rares, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET notent que la masse des aimants permanents présents dans les machines synchrones à entraînement direct a fait l'objet d'évaluations qui varient fortement : de 160 kg/MW pour la valeur la plus basse à 1 t/MW (valeur la plus haute) — à titre indicatif, le rapport du CGEDD/CGEIET a retenu 800 kg/MW (mais voir cet [avis technique](#) de l'Ademe, qui compte 638 kg d'aimants permanents par MW). Partant de l'hypothèse selon laquelle la part des éoliennes synchrones à entraînement direct avec aimants permanents est de 3 % dans le parc français (le chiffre admis en 2023 est de 6 %), les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET évaluent le flux de terres rares issues du démantèlement des parcs éoliens en 2030 (flux max.), ainsi que le flux cumulé sur la période 2011-2038 (cf. illustration ci-après).

Terres rares produites par le démantèlement des éoliennes	Proportion dans les aimants permanents	Flux en 2030 (tonnes)	Flux cumulé sur 2011 à 2038 (t)
Néodyme	21 %	7,5	69,5
Praséodyme	7,2 %	2,6	24
Dysprosium	1,5 %	0,55	5
Terbium	0,3%	0,1	1
Total	30%	10,75	99,5

Terres rares issues du démantèlement des parcs éoliens, d'après Ademe (source : [rapport](#) du CGEDD/CGEJET, 2019).

Et, sur la base des cours de 2017, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEJET ont estimé la valeur des terres rares issues du démantèlement des éoliennes en 2030 (pic de production de déchets), ainsi que la valeur cumulée sur la période 2011-2038 : ils en concluent que les terres rares issues des parcs éoliens démantelés en France ne sauraient justifier à elles seules une usine de traitement des aimants permanents, qui nécessiterait d'autres sources (composants électroniques, etc.) que les parcs d'éoliennes démantelées.

Comme cela a été souligné plus haut, les flux des différents matériaux susceptibles de sortir des parcs éoliens en fin de vie sont également fonction de la durée de vie des éoliennes. La durée de vie des machines dépend de l'évolution physique de leurs composants (durée de vie technique) mais aussi et surtout de la stratégie suivie par les exploitants après 15 ou 20 ans (voir plus loin, à propos du repowering et des tarifs de rachat de l'électricité). Les auteurs de cette [étude](#) de l'Ademe, publiée en juillet 2020, relative aux stratégies envisageables en matière de renouvellement des parcs éoliens terrestres en fin d'exploitation, ont réalisé une estimation (cf. sections 4.9 et 9.3) de la durée de vie technique des éoliennes, afin de donner une tendance du potentiel technique d'extension de durée de vie des parcs éoliens français, en distinguant le Sud (parcs les plus anciens) et le Nord (parcs plus récents) de la France : tous composants confondus, les auteurs concluent à un potentiel d'extension de durée de vie plus important pour les parcs situés au Nord que ceux du Sud.

Les opérations de repowering

Outre le démantèlement d'éoliennes ayant atteint leur fin de vie, certains champs éoliens sont démantelés avant leur terme et rééquipés avec des éoliennes de nouvelles générations, plus puissantes et plus efficaces (opération dite de repowering). En pratique, les modifications et techniques d'un parc éolien peuvent se limiter au remplacement des turbines mais consiste le plus souvent à remplacer les éoliennes anciennes, généralement plus petites, par des ensembles {mât, turbines, pales} de conception plus récente, de plus grandes dimensions et présentant un meilleur rendement. Ainsi, selon l'Ademe (voir cette [étude](#) de septembre 2017), le repowering (ou renouvellement), qui correspond à un remplacement intégral de l'installation entraînant des modifications substantielles (dimensions des éoliennes, extension, emplacements...), se distingue du revamping (réaménagement) caractérisé par des changements de composants avec modification des caractéristiques principales de l'installation (type, dimensions, diminution du nombre d'éoliennes), ainsi que du rétrofit (maintenance lourde) qui correspond à des changements de composants principaux de l'éolienne (pales ou générateur par exemple) sans modification des caractéristiques principales de l'installation (type, dimensions, nombre et emplacements des éoliennes).

Dans le prolongement de l'étude de 2017, l'Ademe a publié en juillet 2020 le [rapport](#) d'une autre étude relative aux stratégies envisageables en matière de renouvellement des parcs éoliens terrestres en fin d'exploitation. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) publiée en avril 2020 par le gouvernement français prévoit de plus que doubler la puissance éolienne installée pour atteindre environ 34 GW en 2028, faisant passer le parc éolien d'environ 8 000 mâts à fin 2018 à environ 14 000 mâts. Au cours de la même période, des parcs représentant une capacité cumulée de 7 GW arriveront au terme de leur contrat d'obligation d'achat. Se pose ainsi la question de la place du renouvellement des parcs éoliens dans l'atteinte des objectifs de la PPE et du gisement associé à leur renouvellement, au regard des différentes options possibles qui s'offrent aux exploitants et de leurs

conséquences en termes techniques, économiques et environnementaux. L'étude de l'Ademe analyse, dans le cadre de l'application de la réglementation en vigueur, le potentiel associé au renouvellement des parcs éoliens français et les enjeux que cela soulève, des points de vue technico-économique, environnemental et réglementaire.

Dans cette étude, les options stratégiques (définies en tenant compte de la réglementation en vigueur) à la fin de la vie technique ou économique d'un projet, postérieurement à la sortie du contrat d'obligation d'achat (OA), servent de base à la caractérisation de l'ensemble du parc éolien français. Cette caractérisation s'appuie sur une base de données (742 parcs, pour une puissance totale installée de 9 195 MW) couvrant tous les parcs éoliens terrestres en France installés durant la période s'écoulant du début des années 2000 jusqu'à fin 2014. L'Ademe rappelle que pour un producteur, il existe principalement quatre variantes de sortie d'OA, combinant démantèlement, poursuite de l'exploitation et renouvellement de différents types (cf. illustration ci-après) :

- variante A : cycle court à l'issue duquel le parc initial est démantelé en sortie d'OA à 15 ans lorsque cette échéance correspond à la fin de sa vie technique ou économique ;
- variante B : identique au cycle A, mais pour raison de renouvellement plutôt que pour raisons techniques ou économiques ;
- variante C : cycle consistant en une poursuite de l'exploitation du projet, encore rentable, en sortie d'OA jusqu'à ce que le projet atteigne la fin de sa vie technique et/ou économique et que le producteur procède à son démantèlement ;
- variante D : identique au cycle C, mais avec un renouvellement après le démantèlement du projet initial.



Les différentes options possibles en sortie d'OA (source : [Ademe](#), 2020).

Les variantes A et B peuvent s'imposer aux producteurs pour diverses raisons :

- bris irréparables sur des éléments structurels de la machine (pale, tour, moyeu) ou des éléments rotatifs principaux ;
- condition matérielle générale des composants impactant de façon importante leur disponibilité (arrêts récurrents dus à de fausses alertes complexes à diagnostiquer) ou présentant un risque pour le personnel (absence de systèmes de protection d'arbre rapide par exemple) ;
- difficultés d'approvisionnement en pièces de rechange qui ne permettent pas au projet de trouver un équilibre économique sur le marché ;
- échéance des baux, même si ceux-ci sont généralement engagés sur des périodes plus longues ;
- expiration des autorisations (non applicable à la France) ;
- durcissement des conditions d'exploitation du parc par le gestionnaire du réseau (non applicable à la France) ;

- dans la variante B, choix du producteur vis-à-vis de l'opportunité que constitue la réalisation d'un projet plus performant et/ou de plus forte capacité sous un mécanisme de soutien différent.

En pratique, il n'y a que quelques moments majeurs au cours de la vie d'un projet éolien, auxquels une décision est prise concernant une transition potentielle : les quelques années précédant l'échéance du tarif d'achat et, annuellement ou biannuellement, lors de l'exploitation du projet post-OA.

En France, la durée du contrat d'obligation d'achat de 15 ans (en vigueur jusqu'à 2016) est inférieure aux durées de vie techniques attendues pour la plupart des parcs éoliens concernés par l'étude de l'Ademe — mais certains renouvellements peuvent s'avérer nécessaires dès 15 ans pour certains parcs, ponctuellement. Les auteurs de l'étude ont fait l'hypothèse que l'exploitation est d'abord prolongée (première transition : entre période initiale d'exploitation sous OA et la période de poursuite d'exploitation post-OA), la deuxième transition s'opérera plus ou moins tôt pour chaque parc en fonction des perspectives de renouvellement et des politiques publiques s'appliquant sur les parcs concernés, propices à la poursuite de l'exploitation ou au renouvellement en fonction des cas.

Selon ces auteurs, les renouvellements à capacité et production équivalentes en sortie d'OA présentent un intérêt limité pour les différents acteurs en raison de leur faible compétitivité et de gains de production relativement limités. Sous conditions des prix de marché actuels ou de prix garantis pour les opérateurs, une poursuite de l'exploitation sur le marché ou sous un régime spécifique jusqu'à la vingtième année des parcs au minimum est pertinente pour les opérateurs et préférable du point de vue des dépenses publiques. En outre, l'ensemble des acteurs pourraient trouver un intérêt commun à opérer les renouvellements permettant des gains de capacité et de production substantiels avant cette vingtième année. Ces renouvellements pourraient engendrer des gains de capacité et de production à un coût marginal plus faible que celui de nouveaux projets. Par ailleurs, ces renouvellements pourraient constituer un levier aux enjeux de saturation. Enfin, si aucun renouvellement n'est possible, tant du point de vue de l'administration que de l'opérateur, un démantèlement est opéré en fin de vie technique ou économique du parc, soit dans le cas général bien après le vingtième anniversaire du parc.

Dans la réalité, il existe diverses combinaisons des 4 variantes présentées ci-avant (A, B, C, D), constituant plusieurs catégories fines de gestion de fin de vie d'un parc donné (cf. illustration ci-après) :

- managed decline (déclin maîtrisé) ;
- sweat (exploitation à outrance / poussée) ;
- overhaul (reconditionnement) ;
- decommission (démantèlement) ;
- upgrade (modernisation) ;
- returb (changement de turbine) ;
- refound (changement de fondations et des turbines) ;
- redev (nouveau développement).

FAIBLE			Degré d'intervention					ELEVE
Extension de vie			Démantèlement	Renouvellement				
Managed decline	Sweat	Overhaul	Decom.	Upgrade	Returb	Refound	Redev	
(Déclin maîtrisé)	(Exploitation à outrance)	(Reconditionnement)		(Modernisation)	(Remplacement des éoliennes)	(Remplacement des éoliennes et des fondations)	(Nouveau développement)	
Eoliennes progressivement mises hors service lorsque les revenus ne couvrent plus les Opex. Baisse des Opex mais aussi de la disponibilité et de la longévité.	Tire le maximum de production dans une logique court terme, sans maintenance préventive ou modernisation. A l'extrême : modification des paramètres pour améliorer la performance.	Remise en état des machines pour prolonger la période d'exploitation. Ne vise pas à améliorer les caractéristiques des machines.	Démantèlement intégral de l'installation.	Modernisation des machines pour en améliorer les performance, la disponibilité et la durée de vie. Nécessite des CAPEX.	Renouvellement des éoliennes en réemployant les fondations existantes et l'infrastructure électrique. Puissance installée identique ou en légère augmentation.	Renouvellement des fondations et aérogénérateurs avec très légères modifications de l'implantation et de l'enveloppe pour bénéficier de procédures administratives simplifiées.	Version la plus poussée du renouvellement sur la base d'un redéveloppement de projet complet. Objectif de capacité et de diamètres rotor augmentés.	

Analyse fine de gestion de fin de vie d'un parc donné (source : [Ademe](#), 2020).

Et selon la catégorie de fin de vie, les paramètres déterminants de l'investissement (puissance de l'éolienne, raccordement, localisation des machines, Capex et Opex, etc.) varient considérablement (cf. illustration ci-après).

	Degré d'intervention							
	Extension de vie			Démantèlement	Renouvellement			
	Managed decline / Déclin maîtrisé	Sweat / Exploitation à outrance	Overhaul / Reconditionnement	Decom. / Démantèlement	Upgrade / Modernisation	Returb / Remplacement éoliennes	Refound / Remplacement éol.+fond.	Redev / Redéveloppement
Capacité	Déclin	Inchangé	Inchangé	-	Inchangé	Inchangé	Inchangé / Augm.	Inchangé / Augm
WTGs	Inchangé	Inchangé	Inchangé	-	Rotor / Contrôle	Neuf	Neuf	Neuf
Foundations	Inchangé	Inchangé	Inchangé	-	Inchangé	Inchangé / renové	Neuf	Neuf
BoP Electrique	Inchangé	Inchangé	Inchangé	-	Inchangé	Inchangé / renové	Inchangé / renové	Neuf
Localisations	Inchangé	Inchangé	Inchangé	-	Inchangé	Inchangé	Inchangé / Neuf	Neuf
CapEx	N / A	N / A	Modéré	Modéré	Modéré / Elevé	Elevé	Elevé	Très élevé
OpEx	Réduction	Augmentation	Maintien	-	Maintien / Réduct	Maintien	Maintien	Maintien

Principaux paramètres déterminant les catégories de gestion de fin de vie d'un parc donné (source : [Ademe](#), 2020).

À un échelon régional, l'Agence régionale énergie-climat (Arec) d'Occitanie a réalisé, de juin 2019 à février 2020, une [étude](#) relative au potentiel de renouvellement du parc éolien en Occitanie, en examinant les scénarios et les impacts sur la trajectoire RÉPos (région à énergie positive) — étude non disponible publiquement.

Tarifs de rachat de l'électricité

À ce stade, il apparaît pertinent de rappeler les [dispositifs](#) de soutien aux énergies renouvelables, en particulier dans le secteur électrique. Il existe deux grands modes de rémunération : l'obligation d'achat (OA) — dont il a été question plus haut à propos des opérations de repowering — et le complément de rémunération. Ces deux dispositifs permettent aux producteurs d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables de sécuriser la rémunération de l'énergie produite, sur le long terme, à un niveau cohérent avec le coût des installations.

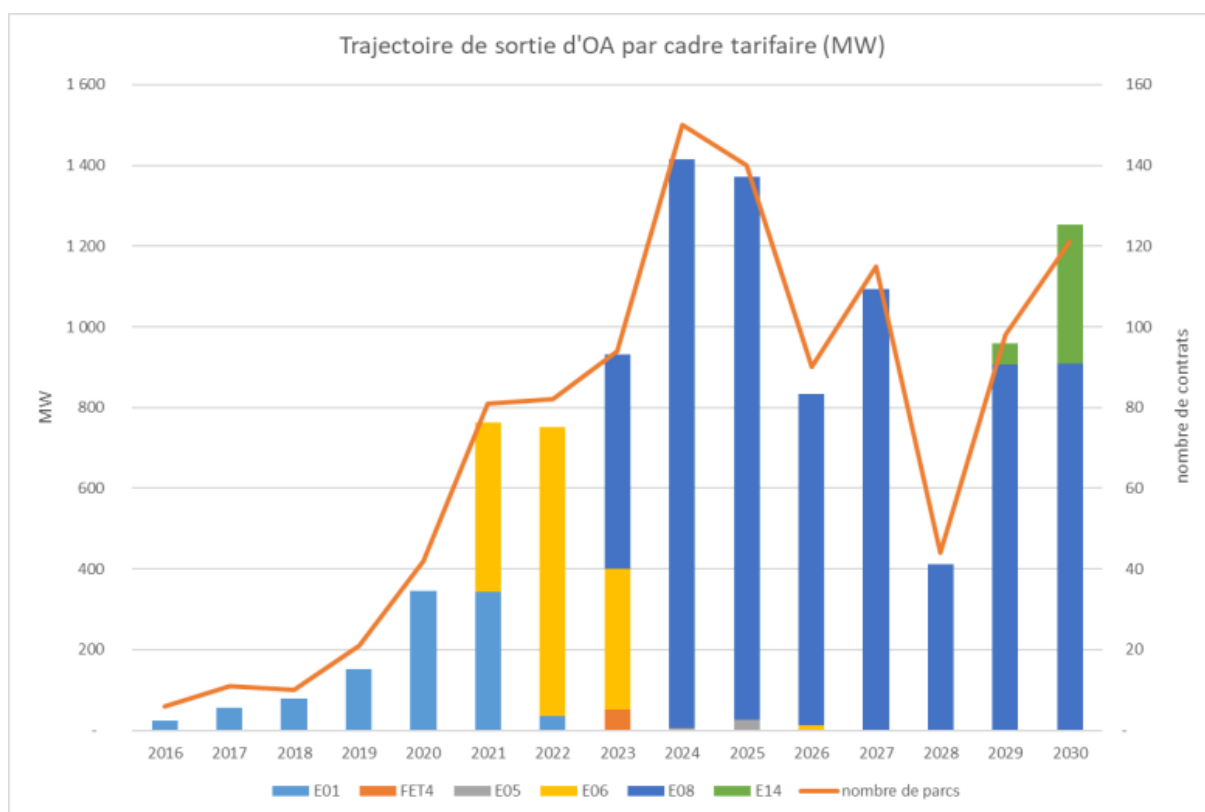
Pour soutenir et développer la filière éolienne, l'État a mis en place en 2000 et jusqu'en 2015 un dispositif incitatif : l'obligation d'achat (OA). Dans le cadre de ces contrats, jusqu'en 2015, EDF et (le cas échéant) les entreprises locales de distribution d'électricité étaient soumises à une obligation d'achat de l'électricité éolienne produite par les exploitants de parcs qui en faisaient la demande, à un tarif d'achat fixé par arrêté. Cet arrêté du 17 juin 2014 (abrogé depuis le 15 décembre 2016) fixait — pour l'éolien terrestre — les conditions d'achat de l'électricité : tarif fixe d'achat garanti pendant une durée donnée (contrats souscrits pour 15 ans), soit 8,2 c€/kWh pendant 10 ans — conditions de 2008 mais actualisé chaque année — puis entre 2,8 et 8,2 c€/kWh pendant 5 ans selon les sites.

À partir du 1^{er} janvier 2016, le dispositif de soutien à l'éolien terrestre a évolué avec la mise en place du dispositif de complément de rémunération dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV). L'électricité produite par les installations est vendue directement par le producteur sur le marché de l'électricité, à un tarif de référence fixé par arrêté : la différence entre ce tarif de rachat et le prix moyen du marché constaté chaque mois (cas où le prix de marché est inférieur au tarif fixé) est versée au producteur éolien ([complément de rémunération](#)) mais, à l'inverse, si le prix est supérieur, les opérateurs éoliens remboursent la différence sur la base des aides perçues de l'État (nouvelle ressource pour l'État).

L'année 2016 est une année de transition pour la filière éolienne : l'[arrêté](#) tarifaire du 13 décembre 2016 fixe les modalités du complément de rémunération pour l'année 2016 et prévoit des contrats de 15 ans et un niveau de tarif à 8,2 c€/kWh pendant 10 ans, puis entre 2,8 et 8,2 c€/kWh pendant 5 ans selon les sites, dans la continuité du niveau de soutien apporté par l'arrêté de 2014.

L'année 2017 voit la mise en place d'appels d'offres pluriannuels pour les grandes installations et la refonte du dispositif de soutien pour les installations de plus petite taille : nouveau dispositif de soutien sous la forme d'un complément de rémunération révisé pour les installations de moins de 6 éoliennes, durée des contrats allongée à 20 ans pour tenir compte des durées de vie des éoliennes, niveau de tarif fixé afin d'assurer une rentabilité normale des projets sur leur durée de vie. Un appel d'offres pluriannuel est également lancé pour soutenir le développement des parcs de plus grande taille. L'appel d'offres « éolien terrestre » lancé en mai 2017 est divisé en 7 périodes réparties sur 3 ans ([listes](#) des lauréats pour les différentes périodes).

Depuis sa mise en place en 2001 jusqu'à sa refonte en 2017, le dispositif de soutien à l'éolien terrestre reposait sur des contrats d'achat d'une durée de 15 ans (l'arrêté du 6 mai 2017 et un [appel d'offres](#) lancé la même année ont porté cette durée à 20 ans), dont l'arrivée à échéance progressive concernera, d'ici fin 2022, 2 GW de puissance puis 1 GW en rythme annuel à compter de 2023, comme l'illustre le graphique ci-dessous, tiré de la [délibération n° 2019-192](#) de la Commission de régulation de l'énergie du 24 juillet 2019 portant avis sur le projet d'arrêté modifiant l'[arrêté du 6 mai 2017](#) fixant les conditions du complément de rémunération de l'électricité produite par les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent, de six aérogénérateurs au maximum.



Puissance (échelle de gauche) et nombre de contrats d'achat (échelle de droite) arrivant à échéance chaque année (source : [délibération n° 2019-192](#) de la CRE, 2019).

Outre la durée de vie technique des machines (cf. supra), la stratégie suivie par les exploitants 15 ans ou 20 ans (obligation d'achat, complément de rémunération) après la mise en service des éoliennes impacte significativement la durée de vie des parcs éoliens et, donc, les flux des différents matériaux susceptibles d'en sortir. La durée de vie des éoliennes n'étant fixée ni réglementairement, ni contractuellement, la fin de vie est déterminée par les choix stratégiques des exploitants, sur des critères avant tout économiques. C'est également l'avis de Natasha Peter, avocate au barreau de Paris, du cabinet Gide, qui note dans cet [article](#) paru le 19 février 2021, sur l'adaptation des procédures d'autorisation pour promouvoir le repowering des installations éoliennes terrestres, notamment en France, que pour un promoteur, décider de renouveler une installation éolienne et choisir le moment et la façon de s'y prendre relèvent du calcul économique. Parmi plusieurs éléments (régime de subvention, possibilité technique d'augmenter la capacité de l'installation, etc.), le régime d'autorisation — encourageant soit l'inertie ou l'innovation dans l'aménagement des installations, la taille des éoliennes, leur capacité, etc. — est un facteur décisionnel crucial que le promoteur prend en compte.

Dans cette [présentation](#) faite lors d'une [conférence](#) sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie en France et en Allemagne, organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)) le 12 mars 2020 à Berlin (dispositifs réglementaires en vigueur, retours d'expérience, aspects économiques, conception, etc. — voir le [programme](#) de cette conférence), [Sibylle Weiler](#), avocate au cabinet Bird & Bird, indique que le calendrier de démantèlement des éoliennes dans les années à venir dépendra des choix faits par les opérateurs à l'issue de la période de validité du tarif de rachat (15 ans pour les éoliennes jusqu'en 2016, 20 ans pour 2017 et années suivantes dans le cadre des contrats de complément de rémunération et procédure d'appel d'offres) :

- poursuivre les opérations (coûts de maintenance) et vendre l'électricité au prix du marché ou en signant des contrats de gré-à-gré de type Corporate PPA (Power Purchase Agreement) à court terme ;
- démanteler l'installation et éventuellement installer des éoliennes plus performantes sur le même site (repowering).

Sibylle Weiler rappelle également les taux de démantèlement des parcs éoliens avancés par le Syndicat des énergies renouvelables (Ser) après consultation de ses adhérents, 15 ans, 20 ans ou 25 ans après la mise en service : 30 %, 80 % et 100 %, respectivement. Ces chiffres sont également

cités dans le rapport du CGEDD/CGEJET de 2019, les auteurs rappelant que la dynamique de démantèlement des parcs éoliens dans les prochaines années dépend fortement des hypothèses de durée de vie moyenne : avec une durée de vie de 25 ans, le flux total matière est estimé à seulement 130 000 en 2023.

Dans le [rapport](#) d'étude de l'Ademe de 2020 (cité plus haut) sur le renouvellement (repowering) des parcs éoliens terrestres en fin d'exploitation, les auteurs indiquent, à propos de la viabilité économique des parcs existants en sortie d'OA, que le débouché principal à la disposition des producteurs est la vente sur le marché de la production, des capacités et des garanties d'origine (GO). Des prix d'achat fixes de la production pour livraison en 2020, 2021 et 2022 ont été obtenus en mars 2019 auprès de trois agrégateurs. Dans le contexte de 2019-2020 relatif aux conditions de marché de l'électricité, et en prenant des hypothèses concernant les prix de vente des capacités et des GO, les auteurs de cette étude ont déterminé un prix de vente de l'énergie, pour 2020-2021-2022, autour de 47-48 €/MWh. Les coûts d'exploitation en sortie d'OA permettent aux parcs de trouver un équilibre sur le marché pour poursuivre l'exploitation jusqu'à 20-25 ans, les coûts d'exploitation de la majorité des parcs dans leurs années 15 à 25 se situant entre 20 et 30 €/MWh.

Aujourd'hui, en 2022-2023, l'évolution en forte hausse du prix de l'électricité est de nature à influencer de manière significative sur la stratégie adoptée par les exploitants de parcs, qui pourraient être encouragés à retarder la fin de vie des éoliennes en prolongeant autant que techniquement possible et économiquement soutenable la durée de vie des machines (absence de repowering). Une telle stratégie, décalant le calendrier des opérations démantèlement, orienterait du même coup à la baisse la génération de flux de déchets. Cette vision est partagée par plusieurs experts interrogés : Vincent Guénard (cité plus haut) de l'Ademe, Camille Charpiat (responsable éolien terrestre) et Anne Georgelin (responsable éolien en mer — citée plus haut) du Syndicat des énergies renouvelables, Pierre Stephan (ingénieur R&D) d'EDF, Louis Flaux (président-directeur général) d'[Eole Constructing](#), Thierry Ternois (directeur service Construction) d'[Elys](#). Mais de l'avis de tous, un tel effet sur le long terme est pour l'heure difficile à quantifier.

Quelques projets de repowering

Le 21 mars 2017, [Kallista Energy](#) lançait le chantier du premier repowering d'un parc éolien en Bretagne avec le renouvellement de son parc de Plouyé (Finistère, Bretagne). Quatre éoliennes mises en service en 2002 et devenues obsolètes ont été démantelées. Le communiqué ne dit rien sur ce qu'il est advenu des éoliennes démantelées. Kallista Energy est également à l'origine du repowering du parc éolien de [Lislet](#) (Aisne, Hauts-de-France), composé de six machines.

Selon cet [article](#) publié par Sia Partners le 16 mars 2020, l'année 2018 a vu se concrétiser un des tout premiers projets de repowering, avec le renouvellement du parc du [groupe RES \(Q Energy France depuis mars 2022\)](#) installé en 2001 à Souleilla-Corbières sur la commune Treilles (Aube, Occitanie), retenu à la suite d'un appel d'offre Commission de régulation de l'énergie (CRE) pour bénéficier d'un complément de rémunération — retour d'expérience emblématique de Q Energy en matière de démantèlement avant repowering, aux dires de Laurie Gilbert, responsable repowering, et Florian D'Angelot, responsable ingénierie éolien chez Q Energy⁷. Les 16 éoliennes d'une puissance de 1,3 MW qui composaient le parc ont été remplacées par un même nombre de machines de capacités 1,5 MW, avec des mâts de même hauteur, la puissance totale du parc passant ainsi de 20,8 à 24 MW. À noter que RES a publié en 2022 un [Guide du repowering](#), citant notamment les chiffres de la base de données experte [The Wind Power](#). L'entreprise y indique que lorsque les parcs éoliens sont proches de leur fin de vie, trois options sont envisageables :

- Run To Destruction (RTD) : il s'agit d'opérer le parc éolien sans apporter de maintenance préventive ou curative lourde jusqu'à la fin de vie technique des éoliennes ;
- Life extension (LE) : il s'agit d'étendre la durée de vie technique des éoliennes par le changement de composants majeurs ou mineurs, dans l'idée d'améliorer leur performance ;
- Repowering : il s'agit de remplacer les éoliennes en opération par de nouvelles éoliennes plus performantes.

Les deux premières alternatives (RTD et LE) ne nécessitent aucune autorisation supplémentaire, exception faite d'un renouvellement des baux fonciers si ces derniers sont arrivés à échéance. À l'inverse, il est nécessaire que l'administration délivre une nouvelle autorisation pour le remplacement

⁷ Q Energy France est sponsor et conférencier au séminaire "End-of-Life-Issues and Strategies" (EoLIS) organisé par WindEurope, et membre actif du GT Repowering organisé conjointement par FEE et le Ser à la demande de la DGPR (Direction générale de la prévention des risques).

des éoliennes existantes (cf. infra, à propos de la réglementation relative à la fin de vie des éoliennes).

À l'été 2019, Engie Green a procédé au [démontage](#) de trois éoliennes du plus ancien parc éolien de France, à Port-la-Nouvelle (Aude, Occitanie), dans le cadre d'un chantier qui se voulait exemplaire en matière de recyclage, de sécurité et de respect de l'environnement. Tous les éléments (mâts, nacelles, câblages, génératrices, huiles et pales) composants les éoliennes visées par le démantèlement ont été démontés, triés et acheminés vers des filières de recyclage et de valorisation spécialisées. Selon l'entreprise, plus de 96 % des composants démantelés des éoliennes ont été recyclés. Les pales ont notamment été valorisées à près de 94 % : 58 % recyclés (fibre de verre) et 36 % (résine) utilisés pour améliorer la performance du processus de recyclage. Au total, seul 1 % du poids total des éoliennes a été éliminé comme déchets. Les fondations n'ont pas été retirées, le site étant encore en exploitation. À terme, Engie Green prévoit également le démontage des deux machines restantes. L'entreprise projette aussi le démantèlement, en vue d'une opération de repowering, des dix machines du parc éolien des [Corbières maritimes](#) à Sigean (Aude, Occitanie).

Le 21 juillet 2020, Alpiq et le groupe RES (Q Energy France depuis mars 2022), ont signé un contrat pour le repowering du parc éolien de Roussas-Gravières (Drôme, Auvergne-Rhône-Alpes), visant à remplacer les six éoliennes du parc et augmenter sa production annuelle d'électricité de 30 %. Les machines seront changées en 2023-2024, le parc aura alors près de 18 ans. Le [communiqué](#) ne dit rien sur ce qu'il adviendra des éoliennes démantelées.

Le parc éolien de Cham Longe, situé sur les communes de Saint-Étienne-de-Lugdarès et d'Astet (Ardèche, Auvergne-Rhône-Alpes), a été renouvelé dans sa quasi-totalité (12 éoliennes sur 14) en 2020 — l'un des [premiers chantiers](#) de repowering en France — par l'entreprise [Boralex](#). Les fondations existantes ont été entièrement détruites pour faire place, aux mêmes emplacements, à des fondations adaptées aux nouvelles machines. Quant aux 12 éoliennes démantelées, celles-ci ont été révisées puis réinstallées sur deux sites en Espagne (marché d'occasion) par l'entreprise espagnole [Sydis](#), et devraient y fonctionner pendant au moins une dizaine d'années encore. Dans le cas particulier de ce chantier, la majeure partie des déchets, essentiellement du béton et de la ferraille, est recyclée (lire aussi cet [article](#)). Un « modèle d'économie circulaire », pour France énergie éolienne ([FEE](#)).

Damien Bouilly, responsable régional développement chez Boralex, évoque ce chantier de repowering à l'occasion du [webinaire](#) EnerGaïa du 22 juin 2021, consacré aux modalités pratiques du démantèlement et repowering d'un parc éolien, organisé en partenariat avec le [Cemater](#) — le forum [EnerGaïa](#) est un événement annuel dédié aux professionnels des secteurs des énergies renouvelables, porté par la Région Occitanie. Autres intervenants : Erwan Sauvegrain, directeur des opérations chez TotalEnergies Renouvelables, Sébastien Duchesne, directeur général chez Mywindparts, et Ronan Guerneur, responsable démantèlement éolien chez Suez.

Autre exemple celui du renouvellement, en 2021, du [parc du Cers](#) près, de Lézignan-Corbières (Aude, Occitanie), détenu par les sociétés Eos Wind et Alpiq Eco Power, qui comptait 10 éoliennes pour une puissance totale de 7,5 MW.

Bilan matières (tonnes par éolienne) :

- 83 tonnes d'acier (mât) ;
- 7 tonnes de pales ;
- 145 tonnes de béton (fondations) ;
- 100 kg de câbles électriques (la totalité des anciens câbles dans le sol ont été retirés, allant au-delà des recommandations réglementaires).

Soit (% masse) :

- 38 % d'acier, revalorisé dans les filières acier ;
- 59 % de gravats, revalorisés dans diverses applications routières ;
- 3 % de matériaux composites, revalorisés en meubles.

En 2021-2022, après mise à l'arrêt des équipements fin 2020, [GEG ENeR](#) (filiale énergies nouvelles et renouvelables de Gaz Électricité de Grenoble — groupe GEG) a réalisé le démantèlement et le repowering du parc éolien de Rivesaltes (Pyrénées-Orientales, Occitanie). Les huit éoliennes sur

place depuis 20 ans ont été remplacées par six éoliennes de nouvelle génération. L'entreprise revendique un taux de recyclage d'au moins 95 % des matériaux de l'ancien parc :

- le béton des fondations, récupéré et concassé, est réutilisé en matériau de construction ;
- l'acier des mâts, refondu, est réutilisé dans la construction ;
- les nacelles sont revendues sur le marché de seconde main ;
- les pales sont reconverties en mobilier urbain.

Des vidéos du démontage des anciennes éoliennes (démantèlement) et du montage des nouvelles machines (repowering) sont accessibles [ici](#).

Le 21 novembre 2022, Boralex a [annoncé](#) la mise en service du premier renouvellement (repowering) d'un parc éolien dans le département de la Somme. Installées en 2005 et exploitées par Boralex depuis 2018, les six éoliennes du parc de Bougainville (Somme, Hauts-de-France) ont ainsi été totalement démantelées et remplacées par six turbines Vestas de dernière génération. Cette opération a permis d'augmenter la puissance du parc de 12 à 18 MW sans emprise supplémentaire foncière, la production d'électricité augmentant de plus de 50 %. Les éoliennes démantelées (hors fondations) vont alimenter le marché de l'occasion européen et bénéficier d'une seconde vie. Les matériaux (béton et acier) extraits des fondations sont recyclés et revalorisés.

EDF Renewables projette de renouveler (repowering) le parc éolien d'[Oupia](#) (Hérault, Occitanie) d'ici à 2023, en remplaçant les 9 éoliennes existantes par 9 machines de nouvelle génération. EDF Renewables évalue le coût du démantèlement des 9 éoliennes du parc à environ 500 000 euros, sans valorisation des éléments qui les constituent. Selon EDF Renewables, le gain des ventes des éléments valorisables permet de diminuer le coût du démantèlement de 10 000 euros par éolienne, soit une diminution de 90 000 euros pour l'ensemble du parc — contact : Delphine Bassou, directrice de projets, EDF Renewables.

Cette revue chronologique des projets n'est pas exhaustive et d'autres projets de repowering de parcs éoliens ont été lancés ces dernières années en France, comme l'indique cet [article](#) d'Enviro2B — site d'information dédié à l'environnement et au développement durable.

Dans son [Atlas 2022](#) (déjà cité plus haut) des parcs éoliens en France, l'Observ'ER recense également, outre les nouveaux parcs et ceux en projet, les parcs éoliens démantelés, ainsi que ceux faisant l'objet de repowering. L'Atlas 2022 identifie ainsi 21 sites issus de repowering, pour une puissance totale de 217,88 MW (154 éoliennes). Cet inventaire concerne 26 sites anciens démantelés, soit 249 machines pour une puissance totale de 153,58 MW (cf. illustration ci-après).

Région	Nombre de sites démantelés	Puissance totale démantelée afin d'être remplacée (MW)	Nombre de sites issus de repowering	Puissance totale de repowering (MW)
Auvergne-Rhône-Alpes	2	22,6	1	39,95
Bretagne	5	37,05	5	54,95
COM (collectivité d'outre-mer)	2	2,38	2	8,53
Corse	1	12	1	11,7
DOM (département d'outre-mer)	8	27,88	4	42,3
Grand-Est	3	11,3	3	15,4
Hauts-de-France	1	4,5	1	4,5
Occitanie	4	35,87	4	40,55
Total France	26	153,58	21	217,88

Opérations de repowering par région (source : [Observ'ER](#), Le Journal de l'Éolien n°46, 2022).

Mais d'autres sites, parmi les plus anciens de France (7 sites identifiés totalisant 8,96 MW), ont été démantelés sans faire l'objet de repowering (cf. illustration ci-après).

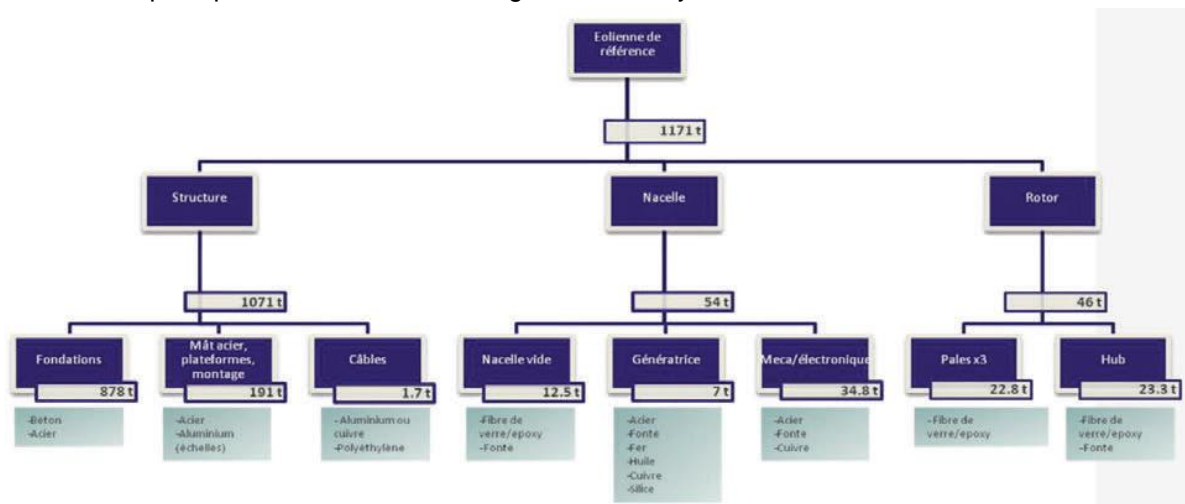
Région	Nom du site	Puissance totale (MW)	Année initiale de mise en service
Occitanie	Port-la-Nouvelle	2	1991
COM	Île de Lifou	0,54	2001
COM	Miquelon	0,6	1999
DOM	Petite-Place	1,5	1997
DOM	Plateau de la Montagne (La Désirade 3)	2,1	2000
DOM	Le Moule	0,02	1999
DOM	Petit-François	2,2	2002

Sites démantelés (source : [Observ'ER](#), Le Journal de l'Éolien n°46, 2022).

Inventaire des matières à valoriser

Pour réaliser l'inventaire des déchets valorisables issus du démantèlement des éoliennes, les auteurs de l'[étude](#) (déjà citée plus haut) de l'Ademe de 2020 sur le renouvellement des parcs éoliens terrestres en fin d'exploitation s'appuient sur les caractéristiques d'une éolienne de référence de 2 MW sur massif béton, représentative des modèles de turbines installées en France entre 2005 et 2009 (cf. illustration ci-après) :

- puissance nominale : 2 MW ;
- diamètre du rotor : 90 m ;
- hauteur moyenne en bout de pale : 140 m ;
- mât : métallique (acier) ;
- arbre principal : boîte de vitesses et génératrice asynchrone.



Bilan de masse d'une éolienne de référence (source : [Ademe](#), 2020).

La répartition massique des matériaux d'une éolienne de référence montre une nette prépondérance de béton (fondation) et d'acier, tel qu'indiqué ci-après :

- béton : 840 tonnes ;
- acier : 246 tonnes ;
- fonte : 42 tonnes ;
- matériaux composites (verre et résine époxy) : 25,1 tonnes ;
- fer : 10 tonnes ;
- cuivre : 4 tonnes ;
- autres : 4,2 tonnes.

On retrouve les principaux éléments métalliques (la masse totale des éléments métalliques représente 310 tonnes par éolienne, la partie la plus importante après les fondations) dans :

- les éléments de structure, en particulier le mât (en acier) qui représente la plus grande partie de la masse métallique : ~ 190 tonnes ;
- les tiges métalliques, intégrées dans la dalle de béton : ~ 40 tonnes ;

- les éléments mécaniques, dont les arbres de transmission et la boîte de vitesse (fer, acier) : ~ 30 tonnes ;
- le moyeu du rotor (en fonte) : ~ 20 tonnes ;
- la génératrice (acier, matériaux ferromagnétiques, cuivre du bobinage) : ~ 15 tonnes ;
- le châssis de la nacelle (en fonte) : ~ 10 tonnes ;
- les pièces électriques ou électroniques (convertisseurs, cellules de coupures et les transformateurs) : ~ 5 tonnes.

On retrouve les principaux éléments non métalliques dans :

- les fondations en béton (~ 840 tonnes) ;
- les pales et le capot de la nacelle, en matériaux composites, le plus souvent en fibre de verre et résine époxy (~ 25 tonnes) — fibres de carbone pour des pales de plus de 70 m,
 - o outre les renforts à base de fibres de verre ou de carbone, les pales sont susceptibles d'incorporer d'autres matériaux pour la matrice polymère (polyester, vinylester, polyuréthane), la structure composite sandwich (bois, polychlorure de vinyle, polyéthylène téréphtalate), ou encore des métaux (câbles en cuivre, boulon) et des enduits.

En termes de quantités de déchets, les auteurs soulignent que la fabrication des pales est génératrice de déchets qui pourraient constituer (à la date de rédaction de l'étude de l'Ademe) jusqu'à 30 % de la masse finale d'une pale. Par ailleurs, une turbine à entraînement direct (cas des machines synchrones, avec rotors bobinés ou à aimants permanents — après 2010) contient une quantité de cuivre nettement supérieure à celle de l'éolienne de référence (machine asynchrone) — variantes technologiques.

Pour mémoire, dans cet [article](#) du 23 novembre 2020, Louis Védrine, étudiant en mécanique des matériaux à l'ENS Paris-Saclay, et [Xavier Jourdain](#), professeur agrégé en génie civil à l'ENS Paris-Saclay et l'[IUT de La Rochelle](#), avaient produit une intéressante synthèse sur le cycle de vie des éoliennes. Sur la base de cette [étude](#) de l'Ademe de 2015 relative à l'Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France, ces auteurs présentent notamment une décomposition d'une éolienne selon ses éléments constitutifs principaux. Selon l'étude de l'Ademe citée, en moyenne, pour 1 MW de puissance installée, un aérogénérateur terrestre nécessite 169 tonnes de métaux divers et 455 tonnes de béton et de ferrailles pour les fondations.

La décomposition proposée par les auteurs de l'ENS Paris-Saclay est telle qu'indiquée dans les deux tableaux ci-après (pour le rotor et la nacelle) :

- rotor :

Composants	Matériaux	Pourcentage massique du rotor
Pales	Fibre de verre ou de carbone	55%
Moyeu	Acier (fonte)	40%
Nez et éléments des pales	Acier et fibre de verre	Moins de 1%
Autres		4%

- nacelle :

Composants	Matériaux	Pourcentage massique du rotor
Arbres, roulement principal frein mécanique, multiplicateur générateur	Acier, cuivre ou aimant permanent	55%
Ensemble cadre-châssis-carénage	Acier inoxydable ou fonte pour les parties du support métallique et plastique renforcé de fibre de verre pour les protections	30%
Système d'orientation	Acier	5%
Transformateur	Acier et cuivre	8%
Autres		2%

À titre indicatif, les pales sont composées à 60-70 % de fibres de renfort et à 30-40 % d'une matrice polymère thermodurcissable — pourcentages donnés en poids de la pale ; voir par exemple cette [étude](#) publiée en mai 2020 conjointement par le Conseil européen de l'industrie chimique (anciennement Conseil européen des fédérations de l'industrie chimique), l'Association européenne de l'industrie des composites [EuCIA](#) (European Composites Industry Association) et l'Association européenne de l'énergie éolienne [WindEurope](#), relative à l'accélération de la transition de l'industrie éolienne vers une économie circulaire en matière de recyclage des pales.

Gisements des déchets de composites

Dans son [guide](#) (rapport technique) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec⁸) publié en mai 2022, l'Ademe établit un état des lieux complet sur le recyclage des composites en France en 2022, comprenant une cartographie qualitative et quantitative des flux matières et gisements de déchets dans l'industrie française des composites, et dresse un état de l'art des solutions composites à faible impact environnemental et des possibilités de revalorisation actuelles des déchets composites.

Pour mémoire, s'agissant du marché de l'éolien, les principales applications des matériaux composites (majoritairement à base de fibres de verre et de résine époxy) sont les pales (principalement), le capot de la nacelle et le hub.

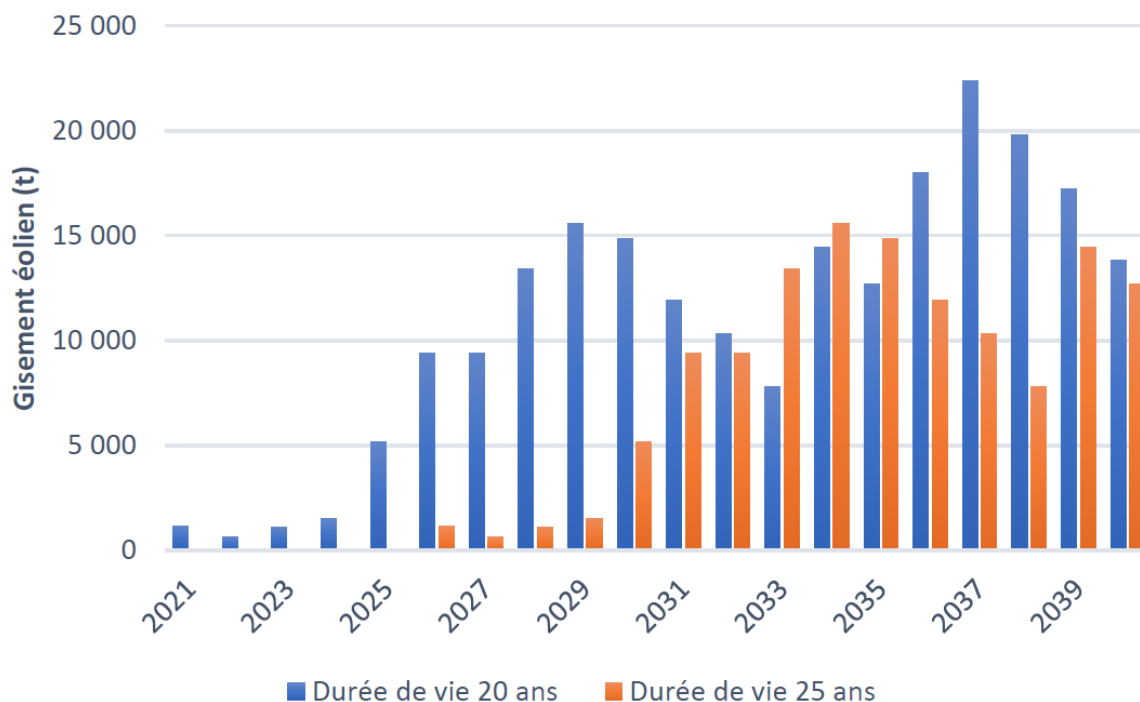
Pour estimer les gisements de déchets composites sur la période 2022-2040, l'étude s'appuie sur plusieurs hypothèses. Observant trois phases de déploiement des éoliennes en France (puissance de l'ordre de 1 MW pour les machines mises en service avant 2005 ; 2 MW entre 2005 et 2009 ; 2 MW après 2010), l'Ademe a défini une « éolienne de référence » dans cette [étude](#) sur le repowering citée plus haut. Une telle éolienne de référence, définie à partir des caractéristiques des éoliennes installées entre 2005 et 2009, est constituée de 25,1 tonnes de matériaux composites (2 % de la masse totale), soit 22,8 tonnes de composites pour les 3 pales (7,6 tonnes de composite par pale), les 2,3 tonnes restantes étant distribuées entre le hub et la nacelle. Outre la composition de l'éolienne de référence, cette étude se fonde également sur la puissance raccordée annuellement (cf. supra), ainsi que sur une durée de vie des équipements comprise entre 20 (hypothèse basse) et 25 ans (hypothèse haute).

Une estimation des gisements de déchets composites des éoliennes en fin de vie (hors déchets de production et de maintenance, hors flux de déchets associés aux opérations de revamping ou de repowering, hors réemplois — non comptabilisés) a ainsi été établie (cf. illustration ci-après). Pour une durée de vie de 20 ans, le gisement de déchets composites devrait augmenter significativement à partir de 2025. Un gisement de 10 000 t/an à 15 000 t/an devrait être disponible en 2031. Le modèle prévoit une baisse des gisements vers 2033 liée à la diminution des puissances raccordées en 2012 et 2013. Pour une durée de vie à 25 ans, l'arrivée en fin de vie des éoliennes est décalée : les volumes de déchets sont très faibles jusqu'à 2030 avant d'augmenter à une moyenne de 10 000 t/an à partir de 2035.

Les renforts à base de fibres de carbone n'ayant été utilisés qu'à partir de 2015, les gisements de déchets sont supposés être majoritairement composés de fibres de verre jusqu'à 2035.

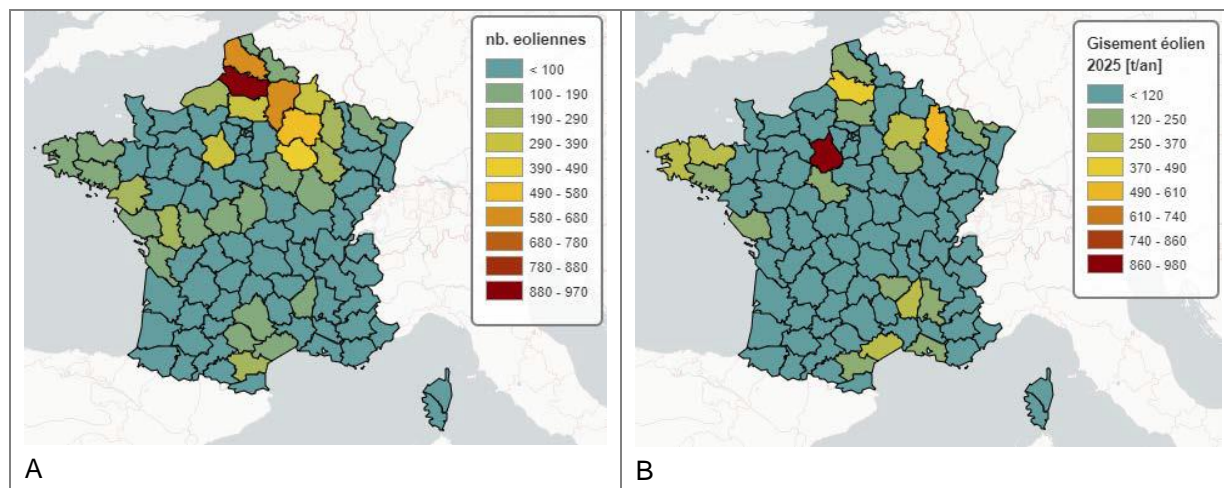
⁸ Pour mémoire, le Comité Recyclage Composites France (CRCoF) avait publié ce [Guide](#) du recyclage des composites, en mars 2017.

Le gisement de déchets composites est donc estimé à 229 000 tonnes sur l'ensemble du parc français sur la période 2022-2040, soit environ 12,7 tonnes par MW installé.

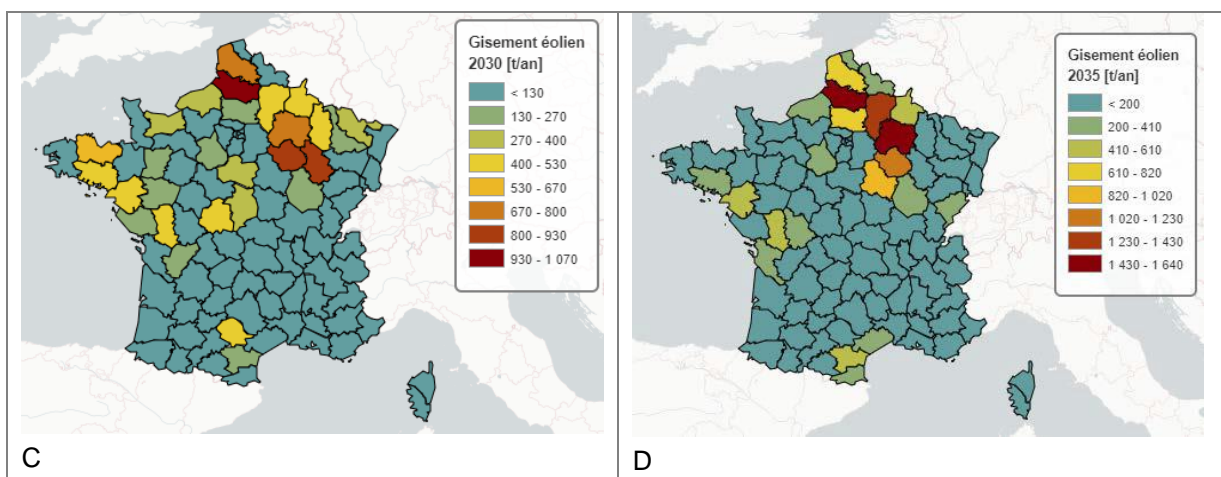


Gisement de déchets composites issus des éoliennes terrestres en fin de vie (source : [Ademe](#), 2022).

À partir d'un jeu de données⁹ fournissant la localisation des parcs éoliens, leur ancienneté et leur puissance, le guide Grec propose également une cartographie du nombre d'éoliennes implantées par département et des gisements de déchets composites sur la période 2022-2040. Les auteurs ont opté pour présenter une valeur moyenne sur des périodes de 3 ans, de 2029 à 2031 puis de 2034 à 2036, avec une hypothèse de durée de vie de 20 ans — cette comparaison permettant d'évaluer la dynamique de génération de déchets sur le territoire (cf. illustration ci-après).



⁹ Cf. [Registre](#) national des installations de production et de stockage d'électricité, qui dans le cas de l'éolien permet de connaître l'âge des parcs et leurs niveaux de production respectifs.



Répartition géographique des éoliennes implantées en France métropolitaine en octobre 2021 par département (A) et gisement annuel de déchets composites en 2025 (B), 2030 (C) et 2035 (D) (source : [Ademe](#), 2022).

1.1.3 - Devenir des éoliennes en fin de vie

Cette partie vise à produire des chiffres de répartition massique entre réemploi, recyclage et élimination des différents composants et matériaux issus du démantèlement des éoliennes en fin de vie.

En France, comme en Europe, la directive-cadre ([directive 2008/98/CE](#)) de l'Union européenne sur les déchets définit les concepts de base liés à la gestion des déchets. C'est aussi cette directive-cadre qui établit la hiérarchie des déchets. La hiérarchie des déchets fixe un ordre de priorité applicable à la législation et aux politiques en matière de prévention et de gestion des déchets. L'objectif est à la fois de réduire à un minimum les incidences négatives de la production et de la gestion des déchets, et aussi de rendre plus efficace l'utilisation des ressources. Cette hiérarchie est souvent présentée sous la forme d'une pyramide inversée (cf. illustration ci-après), où les meilleures options sont situées en haut (prévention) et où celles en bas correspondent aux solutions de gestion des déchets à n'utiliser qu'en dernier recours (mise en décharge).

Keep parts for longer.
Design for easier dismantling and recycling.
Minimise number of materials in design manufacture.

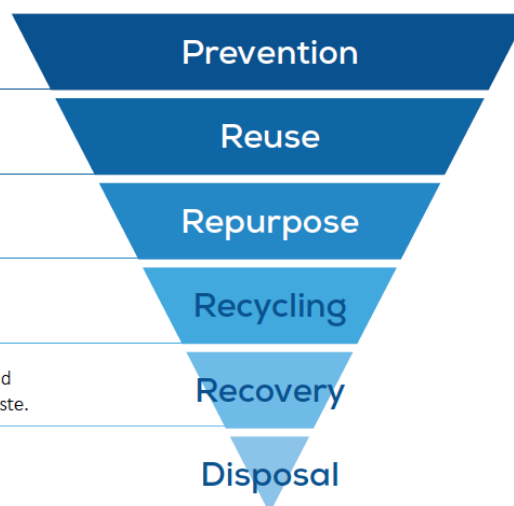
Check, clean, repair whole items or spare parts.

Re-use an existing part for a different application, usually of lower value than the original.

Convert waste into a new substance product.
Includes composting if it meets protocols.

Includes anaerobic digestion, incineration with energy recovery, gasification and pyrolysis which produce energy (fuels, heat and power) and materials from waste.

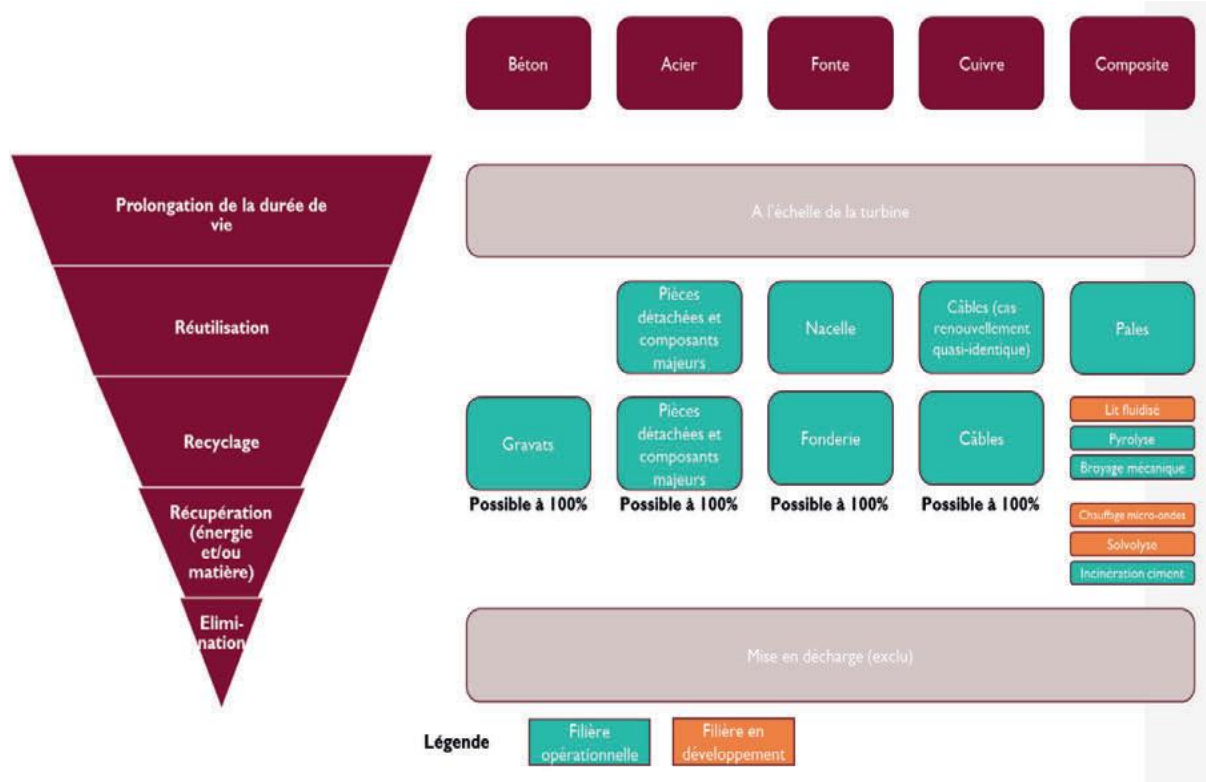
Landfill and incineration without energy recovery.



Hiérarchie des déchets appliquée à la gestion durable des déchets d'éoliennes (source : [ETIPWind](#) — European Technology Platform on Wind Energy, [2019](#)).

Dans cette [étude](#) de l'Ademe (déjà citée plus haut) publiée en 2020 sur les diverses options stratégiques en matière de repowering, les auteurs, après avoir réalisé un inventaire des matières à valoriser (cf. concept d'une « éolienne de référence »), dressent un panorama des méthodes de

valorisation des déchets sur la base de la pyramide de hiérarchie modes de traitement, indiquant que la plupart des matériaux ont des filières de débouchés établies (cf. illustration ci-après).



Méthodes de valorisation des éoliennes terrestres (source : [Ademe](#), 2020).

Les différentes filières de valorisation sont ainsi :

- le reconditionnement et le marché d'occasion et de pièces détachées :
 - o les pièces et machines reconditionnées peuvent être testées et à nouveau garanties, avant d'intégrer un nouveau cycle de vie,
 - o le marché européen d'éoliennes de seconde main, de reconditionnement et de vente de pièces détachées est bien établi avec des acteurs principalement européens [G2WIND](#) (Espagne), [Connected Wind Services](#) (Danemark), [Deutsche Windtechnik](#) (Allemagne) ou encore [Spares In Motion](#) (Pays-Bas), [Renewable Parts](#) (Royaume-Uni), Mywindparts (France — structuration du marché français pas attendue avant 2025, avec l'augmentation des volumes),
 - o mais, citant cette [intervention](#) lors du séminaire sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (Ofate) en mai 2019 à Paris, les auteurs de l'étude de l'Ademe indiquent que la revente de turbines complètes dans d'autres marchés européens (Pologne, Italie, Irlande) est de moins en moins fréquente, la tendance étant à l'utilisation de composants de turbines afin de permettre la poursuite d'exploitation d'autres turbines de la même gamme :
 - les turbiniers et grands opérateurs de maintenance disposent d'un stock de pièces détachées,
 - o le prix de revente dépend largement de la disponibilité des composants sur le marché, de l'état des composants, du délai de mise à disposition ainsi que de la documentation existante (historique de maintenance, rapports d'inspection et photos) :
 - certains composants comme les pales perdent rapidement leur valeur une fois mise à terre, du fait de leur coût de stockage,
 - à l'inverse, une génératrice (système électromécanique) conservera la plupart de sa valeur, même une fois démantelée,
 - dernièrement, on a pu observer des reventes d'éoliennes complètes pour 100 à 200 k€ par turbine (~ 1,5 MW de puissance installée), les frais de dépose et de transport étant à la charge du vendeur (données confidentielles),

- le prix des composants principaux (multiplicateurs, génératrices, transformateurs, axe principal) s'élève à un prix entre 30 et 50 % du prix neuf — il faut également prendre en compte le coût de reconditionnement ;
- le recyclage :
 - cette activité inclut les étapes de transport, de collecte et de tri des matières, qui sont ensuite revendues à des recycleurs dont le rôle est de transformer le gisement en une nouvelle source de matières premières :
 - il existe aujourd'hui des centres de tri spécialisés dans les matériaux ferreux, d'autres dans les déchets inertes issus de l'industrie des bâtiments et travaux publics (déchets industriels banaux – DIB),
 - certaines entreprises sont à même de prendre en charge tous les aspects de la fin de vie des matériaux (transport, collecte, tri, recyclage et valorisation, distribution, etc.),
 - les voies de recyclage et de valorisation, ainsi qu'une estimation des recettes et dépenses associées sont présentées (cf. illustration ci-après),
 - l'étude présente également un état des lieux des techniques de valorisation des composites (cf. infra, à propos des technologies et procédés de recyclage et valorisation) ;

Matériau	Solution de recyclage et de valorisation	Recettes nettes	Dépenses nettes
Béton	Déchet inerte. Aucun traitement n'est nécessaire. Est réutilisé après concassage soit comme matériau de construction (remblais de voirie, assise de chaussée, etc.) soit pour la fabrication de béton neuf (sous forme de granulats). Filière existante et non saturée (dizaines de millions de tonnes). Source RECYBETON 2018.	-	~30 €/tonne. Dépend des opportunités de réutilisation (chantiers) à proximité.
Acier	Recyclable sans perte fonctionnelle après séparation et tri. Filière existante et non saturée (dizaine de millions de tonne). Source ADEME 2010).	De 30 à 250 €/tonne. Très incertain car dépend du cours des métaux usagés. Expérience limitée des sociétés de recyclage sur les éoliennes (en France).	-
Fonte	Recyclable après séparation et tri. Filière existante – utilisant principalement des matériaux recyclés (fonte graphite lamellaire - GL).	De 30 à 250 €/tonne. Très incertain car dépend du cours des métaux usagés.	-
Matériaux composites (verre/epoxy)	Solutions de recyclage et de valorisation existantes à différents degrés de maturité. Perte partielle des propriétés mécaniques après recyclage. Filière existante en valorisation mixte avec une demande limitée par rapport à l'offre (d'origine autre qu'éolienne notamment). L'incinération n'est valable que pour les pales à fibre de verre (et non de carbone).	-	~95-110 €/tonne hors transport et découpe. Dépend de l'offre en combustible de récupération (CSR) (avec variations à anticiper avec l'augmentation des volumes issus de l'éolien).
Cuivre	Recyclable sans perte fonctionnelle après séparation des isolants et tri. Filière existante et non saturée.	~3 500 €/tonne. Très dépendant des cours des métaux usagés.	-

Décomposition matière de l'éolienne de référence (source : [Ademe](#), 2020).

- la mise en décharge (cf. ci-après, loi Agec).

Loi Agec - La [loi](#) du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (Agec) prévoit que les producteurs ou les détenteurs de déchets ne peuvent éliminer ou faire éliminer leurs déchets dans des installations de stockage ou d'incinération de déchets que s'ils justifient qu'ils respectent les obligations de tri (article 6) et interdit progressivement la mise en décharge des déchets non dangereux valorisables (article 10). Deux textes parus en septembre 2021 ont précisé ces dispositions.

Il s'agit d'une part du [décret](#) n° 2021-1199 du 16 septembre 2021 relatif aux conditions d'élimination des déchets non dangereux, qui liste les déchets non dangereux valorisables, progressivement interdits d'élimination dans les installations de stockage et d'incinération. L'interdiction progressive de mise en décharge est détaillée dans la première partie du décret (article 1), qui introduit l'article R.541-48-3 dans le Code de l'environnement. Le calendrier s'étale du 1^{er} janvier 2022 au 1^{er} janvier 2028 en fonction des types de déchets valorisables. À partir de 2022, il est ainsi interdit d'envoyer en décharge des bennes constituées de plus de 30 % de plastique¹⁰ (en masse), de plus de 30 % de fraction minérale inerte composée de béton, de briques, de tuiles, de céramiques et de pierres. Dans une seconde phase, c'est un régime cumulé qui prendra place : 70 % de l'ensemble des déchets listés en 2025, puis 50 % en 2028.

D'autre part, certains types de déchets bénéficient de dérogations à l'interdiction de mise en décharge. Il s'agit en particulier de déchets non valorisables issus d'opérations de valorisation de déchets ou de processus de production (rebus ou scraps). Pour cette dernière catégorie, l'[arrêté](#) du 16 septembre 2021 pris en application des articles R. 541-48-3 et R. 541-48-4 du Code de l'environnement, fournit la liste des déchets concernés : y figurent notamment les déchets de matériaux à base de fibre de verre (code 10 11 03 dans la [nomenclature](#) des déchets).

À propos du traitement et du recyclage du béton issu des éoliennes, dans ce [document](#) présenté le 12 mars 2020 à Berlin lors d'une [conférence](#) organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)) sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie en France et en Allemagne (dispositifs réglementaires en vigueur, retours d'expérience, aspects économiques, conception, etc. — voir le [programme](#) de cette conférence), Benoist Thomas, secrétaire général du Syndicat national du béton prêt à l'emploi ([SNBPE](#)), présente une estimation des volumes de béton associés au recyclage à venir des fondations, suite au démantèlement des éoliennes terrestres en fin de vie, sur la période 2020-2030 (cf. illustration ci-après — on retrouve des chiffres identiques à ceux tirés du rapport du CGEDD/CGEJET de 2019).

Year	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
kTons of concrete to be recycled	15	12	26	35	69	167	294	363	459	607	713

Flux sortants de béton à recycler, exprimés en milliers de tonnes (source : [présentation](#) de Benoist Thomas à Berlin, 2020).

La densité élevée de l'acier constituant l'armature des fondations peut conduire à deux opérations différentes : une première, réalisée mécaniquement, pour casser la fondation et retirer la majeure partie de l'acier, puis une seconde opération, comportant une part plus importante d'intervention humaine, pour trier le béton et l'acier restant. Le béton concassé peut ensuite être incorporé dans du nouveau béton (cf. projet de R&D [Recybéton](#) et [présentation](#) de Benoist Thomas). Le béton issu de la déconstruction des éoliennes suit les filières de traitement du béton de déconstruction en général, caractérisé par un impact économique et environnemental élevé du transport routier. Dans ce contexte, les acteurs du secteur se sont engagés depuis quelques années vers une autre forme de valorisation, en cohérence avec la logique de l'économie circulaire, en réutilisant les granulats issus du concassage du béton de déconstruction pour fabriquer à nouveau du béton doté de performances techniques, économiques et environnementales plus satisfaisantes (cf. projet Recybéton cité ci-avant).

S'agissant du béton, cet [article](#) du site [Décrypterlenergie.org](#) (une initiative de l'association [négaWatt](#)), publié le 16 janvier et modifié le 26 mars 2020, relatif à la contribution de l'éolien dans la bétonisation et l'artificialisation des terres, fournit quelques données intéressantes sur les dimensions et masses des fondations. Un aérogénérateur de 2 MW, constitué d'un mât de 80 mètres de hauteur et d'un rotor de 80 mètres de diamètre pour une masse d'environ 250 tonnes (modèle d'éolienne répandu en France), nécessite une excavation de près d'une vingtaine de mètres de diamètre et d'une profondeur de 3 mètres. Au fond de cette excavation, un coffrage d'environ quinze mètres de diamètre est rempli de 1 à 1,5 mètre de béton, soit une masse d'environ 600 tonnes de béton et 25 tonnes d'acier (armature métallique). Les modèles d'éoliennes les plus récemment installés en France sont dotés d'un mât de 100 mètres de hauteur et d'un rotor de 100 mètres de diamètre, pour une puissance de 3 MW. La fondation a une vingtaine de mètres de diamètre, pour une profondeur toujours de 3 mètres : le béton atteint une masse de 800 tonnes, pour 40 tonnes d'acier. Il s'agit d'un ordre de grandeur car la quantité de béton utilisée varie selon les installations et il n'existe pas de corrélation directe entre la

¹⁰ Le Syndicat des énergies renouvelables (Camille Charpiat) n'a « pas connaissance de sites d'enfouissement de type cimetières en France », « pour une question d'image, les acteurs de l'éolien n'ont pas d'intérêt à enfouir les pales ».

puissance électrique d'une éolienne et le volume de béton des fondations. Le dimensionnement des fondations dépend non seulement de la prise au vent et du diamètre du rotor mais il est également déterminé par les caractéristiques du sous-sol. Le besoin d'augmentation de la masse des fondations se traduit par un diamètre plus grand, dépassant la vingtaine de mètres de diamètre pour les éoliennes d'aujourd'hui, et non par une excavation plus profonde.

Cet article évoque également le sujet de la réutilisation des fondations (voir ci-après, projet FEDRE). Les fondations des éoliennes de première génération ne sont pas réutilisables pour de nouvelles machines pour deux raisons principales. D'une part, elles n'ont pas été conçues pour de tels réemplois et il est extrêmement délicat d'évaluer leur fatigue après une vingtaine d'années d'exploitation. D'autre part, le gabarit des machines a significativement augmenté en une quinzaine d'années, et les anciennes fondations seraient insuffisantes pour résister aux charges mécaniques d'éoliennes deux à trois fois plus puissantes. Par ailleurs, les espaces entre les machines augmentant avec les nouvelles éoliennes, les emplacements des anciennes fondations ne concordent pas avec les besoins des nouvelles. En revanche, en ce qui concerne les éoliennes récentes, avec une certaine tendance au plafonnement de leur hauteur, en particulier dans les sites à contraintes aéronautiques, il est possible d'envisager des fondations d'éoliennes, ainsi que des mâts, conçus pour durer une quarantaine d'années, ce qui minimiserait globalement la consommation de béton. Il s'agit alors de choix techniques et économiques de moyen terme, qui ne sont pas nécessairement encouragés aujourd'hui par les pouvoirs publics.

Sur le béton des fondations, cet autre [article](#) de La Nouvelle République du 16 décembre 2020 (entretien avec France énergie éolienne). La puissance des éoliennes installées en France oscille entre 2 MW (la majorité) et 4 MW. Les fondations représentent entre 350 et 450 m³ de béton (soit 875 à 1 125 tonnes, en prenant une masse volumique = 2,5 t/m³). Il existe deux principaux types de fondations (massifs) : les fondations superficielles (massifs gravitaires), lorsque le sol d'assise est homogène et de bonne portance et les fondations sur pieux, lorsque le sol d'assise présente une portance trop faible et que le bon sol se trouve à une profondeur importante, de l'ordre de plus de 15 m. Dans certains cas intermédiaires, il est possible de procéder à un renforcement mécanique du sol d'assise afin de pouvoir réaliser des fondations superficielles. Les fondations superficielles sont composées d'une assiette en partie inférieure, surmontée d'un socle incluant une pièce d'interface (virole ou cage d'ancrage) sur laquelle la tour de l'éolienne est boulonnée. Pour une éolienne standard de puissance nominale 2 MW, le volume de béton varie de 250 m³ à 400 m³. Les fondations sur pieux sont composées d'un massif de liaison ressemblant à une fondation superficielle, reposant sur des pieux généralement disposés en cercle sous le massif. Les pieux sont forés jusqu'à atteindre les éléments stables du sol, et assurent la transmission des efforts. Pour une éolienne standard de puissance nominale 2 MW, le volume de béton (hors pieux) est de 250 m³ à 350 m³. La profondeur des pieux varie de 10 m à 30 m.

Toujours concernant le béton et l'éventuelle réutilisation des fondations, pour éviter de déconstruire les fondations des éoliennes terrestres dans le cadre d'une opération de repowering (soustrayant ainsi du recyclage tout ou partie du béton et des armatures métalliques), le projet [FEDRE](#) (Fondations d'Éoliennes Durables et REpowering) porté par AnteaGroup et sous la direction scientifique du laboratoire [GéoMaS](#) (Géomécanique, Matériaux, Structures) de l'Insa de Lyon, vise à optimiser les fondations existantes, ainsi que celles des nouvelles fondations en envisageant une conception évolutive de celles-ci. Le projet FEDRE, labellisé par le pôle de compétitivité [Tenerdis](#), prendra fin le 30 juin 2023. Contacts : Laurent Briançon, maître de conférence, Insa Lyon, directeur scientifique du projet FEDRE | Éric Antoinet, directeur technique infrastructures, [Antea Group](#), directeur du projet FEDRE.

Afin d'apporter un éclairage, fondé sur des retours d'expérience, notamment sur la question des chiffres de répartition massique entre les différentes voies (réemploi, réutilisation, recyclage, élimination des différents composants et matériaux), plusieurs entreprises ont été interrogées : d'une part la plupart des acteurs industriels membres du Comité de pilotage et de suivi de l'étude ([EDF](#), [Engie](#), [Renault](#), [Séché Environnement](#), [Suez](#), [Total Energies](#), [Veolia](#)) et, d'autre part, des entreprises ou groupes d'entreprises actives sur le segment du démantèlement ([Arkolia Energies](#), Association pour le développement de la filière démantèlement, recyclage, reconditionnement, revente en région Grand Est — [AD3R](#), [BayWa r.e.](#), [Boralex](#), [Elys](#), [Engie Green](#), [Eole Constructing](#), [ERG France](#), [Escofi](#), France Énergie Éolienne — [FEE](#), [GEG ENeR](#) — filiale énergies nouvelles et renouvelables de Gaz Électricité de Grenoble du groupe GEG), [Kallista Energy](#), [Mywindparts](#), [Net-Wind](#), [Ortec](#), [RES France](#) — [Q Energy France](#), [Sepale](#), Syndicat des énergies renouvelables — [Ser](#), [Valrea](#) du groupe Valorem, [Velocita Energies](#) du groupe Envision Energy.

L'entreprise [Escofi](#) développe, construit et exploite des sites d'énergies renouvelables principalement dans l'éolien et le photovoltaïque. Les chiffres de recyclage d'un parc éolien communiqués par cette entreprise sont les suivants (repowering d'un parc éolien) :

- fondations en béton armé :
 - o 13 % armatures en acier, recyclées intégralement,
 - o 87 % béton, concassé et valorisé en agrégats pour la stabilisation des sols ;
- nacelle :
 - o 80 % composants en acier, aluminium, fonte, cuivre, etc., recyclés intégralement,
 - o 20 % matériaux composites, broyés avant valorisation énergétique ;
- rotor (pales et moyeu) :
 - o ~ 90 % matériaux composites, broyés avant valorisation énergétique ;
- Mât :
 - o 100 % acier, recyclé intégralement.

Pour Sébastien Duchesne, directeur général de [Mywindparts](#), que les pales en matériaux composites soient en résine et fibre de verre pour les technologies anciennes ou résine et fibre de carbone pour les technologies plus récentes, leur recyclage doit prendre en compte d'autres secteurs utilisateurs (nautisme, aéronautique, différents transports terrestres, sports et loisirs, électriques et électroniques, déchets de production et de maintenance, etc. — cf. le [guide](#) de l'Ademe déjà cité sur le recyclage et l'écoconception des composites). Avis partagé par Jérémy Simon, délégué général adjoint, et Camille Charpiat, responsable éolien terrestre, du Syndicat des énergies renouvelables (Ser), dans cet [article](#) de La Nouvelle République paru le 16 décembre 2020, qui rappellent que les matériaux composites à base de résines thermodurcissables et de fibres de verre ou de carbone sont largement utilisés dans d'autres secteurs industriels et dans des quantités bien plus grandes que dans l'éolien. Ces matériaux ne disposent actuellement pas de solutions de recyclage à grande échelle. Un travail avec tous les utilisateurs de composites s'avère nécessaire, et le Ser est en contact avec ces autres secteurs dans le cadre d'un groupe de travail dédié. Selon le dirigeant de Mywindparts, « les réutilisations de pales en mobilier urbain, parcs d'enfants, murs antibruit, sont anecdotiques et ne résolvent le problème qu'à court terme » — nécessaire mise en œuvre de solutions industrielles au regard des volumes à venir à traiter.

Mywindparts promeut le réemploi des éoliennes (machines entières) ou de leurs composants (pièces détachées) dans un marché de seconde main dont le volume est difficile à évaluer (cf. ce [webinaire](#) EnerGaïa du 22 juin 2021 déjà cité, consacré aux modalités pratiques du démantèlement et repowering d'un parc éolien). La vente de pièces détachées constitue l'essentiel de l'activité de Mywindparts, mais la réparation et le reconditionnement représentent une part grandissante de la société. Conformément à la hiérarchie européenne de gestion des déchets, il convient de prolonger la durée de vie des éoliennes, de réemployer les pièces dans un marché de seconde main, de valoriser la matière, de faire de la valorisation énergétique et, en dernier recours, de mettre en décharge. Selon Sébastien Duchesne, « une éolienne peut durer quarante ans si elle est bien entretenue et ne connaît pas d'avarie ». Mywindparts vise plusieurs marchés intéressés par des d'éoliennes de seconde main : l'Afrique, l'Amérique latine ou bien l'Europe de l'Est (Pologne et Hongrie notamment). Mais le dirigeant reconnaît qu'avec la croissance attendue des volumes d'éoliennes démantelées, ces marchés vont rapidement arriver à saturation. Selon Sébastien Duchesne, sur le marché de la seconde main, une machine reconditionnée de 2 MW coûte environ 300 k€.

À noter que jusqu'en 2021, il n'était pas possible de bénéficier d'un contrat de complément de rémunération avec des éoliennes de seconde main car les conditions d'éligibilité incluaient la nouveauté des composants de l'installation. Mais le cahier des charges de l'appel d'offres en cours, lancé à l'été 2021, portant sur la réalisation et l'exploitation d'éoliennes terrestres (cf. [AO PPE2 Éolien terrestre](#)) prévu par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) a introduit plusieurs nouveautés par rapport à l'appel d'offres précédent, en particulier la possibilité d'installer des composants de seconde main¹¹. Aux termes de ce cahier des charges, « seules peuvent concourir des installations nouvelles » d'éoliennes en France, mais que « sont considérés comme neufs les

¹¹ Sur ce point, sur proposition de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) d'intégrer la recyclabilité comme critère de notation des projets candidats aux appels d'offres, voir la position du ministère de la Transition écologique concernant l'exclusion constatée des installations d'éoliennes reconditionnées des dispositifs d'aides publiques. La [mesure](#) annoncée par le ministère en octobre 2020 en faveur de « l'utilisation d'éléments reconditionnés » a vocation à accompagner les mesures prises par le Gouvernement pour améliorer le recyclage des éléments constitutifs des parcs éoliens (cf. les arrêtés du 22 juin 2020, consultables [ici](#) et [là](#)).

éléments n'ayant jamais fait l'objet d'une utilisation préalable ou les éléments ayant été remis en état ».

Autre entreprise pratiquant le réemploi : [Eole Constructing](#), un cabinet d'ingénierie qui intervient en tant qu'assistant à maîtrise d'ouvrage sur toutes les étapes de la vie d'un parc éolien, en particulier en matière de [démantèlement et repowering](#). Dernièrement, Eole Constructing a démantelé un parc dont toutes les machines ont été revendues (marché de seconde main) en Moldavie — prix non communiqué — et il est toujours plus intéressant de revendre une éolienne entière que les matériaux issus de son recyclage. Pour le dirigeant, la seconde main est un marché de niche qui n'a pas forcément un grand avenir pour plusieurs raisons (saturation du marché à terme, risque financier pour les acheteurs et financeurs, manque de pièces détachées pour des modèles qui ne sont plus commercialisés, taille grandissante des machines de ce fait difficilement transportables...). Mais il est encore possible de revendre des éoliennes entières (les modèles anciens) ou seulement des parties : ce qui se vend le mieux, ce sont les équipements de la nacelle (génératrice, démultiplicateur, arbre), le reste part au recyclage — les composants mécaniques et électriques en bon état de fonctionnement sont réutilisables sur d'autres parcs éoliens existants, dans le cadre d'opérations de maintenance et d'entretien courant de parcs existants, de parcs vendant leur électricité au prix du marché sans compensation ou encore via des contrats de gré-à-gré de type Corporate PPA (Power Purchase Agreement). Le site Internet [info-eolien.fr](#), une publication de France énergie éolienne, indique que ce sont les composants principaux (multiplicateur, génératrice, transformateur, axe principal) qui sont reconditionnés puis vendus à un prix oscillant entre 30 et 50 % du prix neuf, et exportés vers l'Afrique ou des pays de l'Est pour y poursuivre une seconde vie.

Sur le sujet du réemploi, selon Wim Robbertesen, directeur général de [Business in Wind](#), une entreprise néerlandaise spécialisée dans le démantèlement et la seconde vie des éoliennes, 80 % des éoliennes démantelées par l'entreprise sont réemployées ailleurs en Europe (Italie, Royaume-Uni, Suède, Danemark). Les 20 % restants sont recyclés car il n'est pas intéressant, sous l'angle économique, de les réemployer. Mais le dirigeant estimait dans cet [article](#) de juin 2021 que dans un délai de deux ans (soit 2023), la tendance pourrait s'inverser, c'est-à-dire que 80 % des éoliennes démantelées par Business in Wind pourrait suivre la voie du recyclage, car le nombre de places pour les turbines usagées est orienté à la baisse et de nouvelles turbines plus grandes et plus compétitives arrivent sur le marché.

Pour Thierry Ternois (déjà cité plus haut), directeur service Construction chez [Elys](#), le marché de seconde main et de réemploi existe mais ce marché a des difficultés à se structurer, et ce pour différentes raisons — stockage des éoliennes et des pièces détachées, disponibilité d'entreprises compétentes pouvant garantir dans des délais souvent très courts la remise en état de fonctionnement des éoliennes de seconde main et des pièces détachées. Les pièces détachées des premières machines démantelées relevant d'une série de machines donnée servent pour les opérations de réparation/entretien/maintenance de machines (installées plus récemment ou moins endommagées, etc.) de la même série encore en service, mais 100 % des machines démantelées d'une série de machines donnée ne trouveront pas leur marché en termes de pièces détachées (saturation du marché). Les dirigeants de Q Energy (déjà cités plus haut) partagent cet avis : le marché de la seconde main concerne les 20 à 30 % premières machines (ou pièces détachées) d'une catégorie à arriver sur le marché d'occasion, ensuite le marché est saturé et les 80 % restants — ne trouvant plus preneurs — partent au recyclage.

Point sur l'association AD3R - En France, la mise en place de l'AD3R (Association pour la Déconstruction des parcs éoliens, le Reconditionnement des gros composants, le Recyclage des pales et la Revente des métaux, des matériaux recyclés et des composants) devait permettre de structurer une filière française de gestion des éoliennes en fin de vie, favorisant notamment la récupération et la revente de différentes composantes d'éolienne. Lors de la réunion de cadrage et de lancement de la présente étude, il avait été signalé la possible existence de données (non accessibles publiquement) détenues par l'association AD3R, l'AD3R envisageant alors de monter une filière en 2017/2018 dans le Grand Est, avec le soutien financier de l'Ademe, le projet n'ayant pas abouti, en raison de volumes insuffisants et d'une absence de rentabilité.

L'AD3R ne dispose pas de site Internet et des extractions de données de presse ([LexisNexis](#)) et une revue d'Internet réalisées à l'échelle de la France à fin 2022 ne révèlent pas d'activité récente de cette association. Pour autant, l'AD3R, dont le siège (et établissement unique) est à Châlons-en-Champagne (Marne, Grand Est) et immatriculée sous le numéro de Siren [838 090 595](#) paraît toujours active. Son président est Didier Évano (contacté), également P.-D. G. de la société [Net-Wind](#), une société de services et d'ingénierie active à l'échelle de la France dans la maintenance, l'exploitation et

le montage de parcs éoliens et aussi spécialiste du remplacement des gros composants d'éoliennes (boîtes de vitesses, génératrices, roulements...) et du démantèlement des éoliennes en fin de vie.

Mais des recherches Internet font également apparaître le nom de Benoît Comfaits, en tant que président d'AD3R et celui de Delphine Garnier, responsable ingénierie. Benoît Comfaits dirige actuellement le cabinet [BCO Conseil](#), à Saint-Dizier (Haute-Marne, Grand Est) immatriculée sous le numéro de Siren [840 105 688](#). Selon cette page [LinkedIn](#) de Benoît Comfaits, l'AD3R a confié la direction de sa stratégie et de ses études à BCO Conseil. Contacté, Benoît Comfaits n'a pas souhaité donner suite et il n'a pas été possible de consulter la base documentaire de l'AD3R. À notre connaissance, la seule ressource concernant l'AD3R disponible publiquement est ce [document](#) de la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (Dreal) du Grand Est, en date du 16 octobre 2017, portant sur une présentation de la démarche D3R.

1.1.4 - Réglementation relative à la fin de vie des éoliennes

Cette partie vise à dresser un état des lieux du cadre réglementaire et des soutiens en vigueur concernant le repowering, le démantèlement, le stockage, le transport et le recyclage des composants issus des installations éoliennes.

Lors de l'édition 2020 du séminaire annuel EoLIS (End-of-Life Issues & Strategies — [EoLIS 2020](#)) de l'Association européenne de l'énergie éolienne [WindEurope](#), qui a permis d'explorer ce qui se passe lorsque les éoliennes atteignent la fin de leur vie opérationnelle et pour les experts de l'industrie de discuter des tendances et évolutions en matière de repowering, de prolongation de la durée de vie, de démantèlement et de recyclage des machines, WindEurope a présenté ce [document](#) d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres (publication en novembre 2020).

Selon Giles Dickson, PDG de WindEurope, le repowering permet de réduire d'un tiers le nombre de turbines tout en triplant la production d'électricité d'un parc donné et de préserver les sites de parcs éoliens existants qui bénéficient souvent des meilleures conditions de vent. Mais pour les sites où le repowering n'est pas envisageable, l'extension de la durée d'utilisation est une option intéressante pour les exploitants de parcs éoliens. Pour Giles Dickson, une prolongation d'un à cinq ans ne poserait aucun problème technique majeur, les constructeurs se basant souvent sur des hypothèses météorologiques bien plus contraignantes que les conditions réelles pour calculer la durée de vie théorique des machines. L'étude de la vie passée des éoliennes et de leur degré de fatigue (historique des maintenances, bris de pièces, etc.), des inspections peuvent aider à calculer la durée de vie résiduelle des machines, ainsi que les interventions nécessaires pour permettre cette prolongation (remplacement de certaines pièces, réparations, etc.) — cf. supra cette [étude](#) de l'Ademe, à propos de la durée de vie technique des éoliennes. WindEurope estime ainsi que la moitié des parcs éoliens existants en Europe verront leur durée de vie prolongée de 5 à 10 ans lorsqu'ils atteindront 20 ans d'exploitation. En revanche, si la prolongation de la durée de vie n'est pas possible, les éoliennes doivent alors être mises hors service et démantelées — voir cet [article](#) paru le 20 novembre 2020 sur le site de la plateforme [EMIS](#) (système d'information pour les professionnels de l'environnement et de l'énergie pour la Région flamande, développé par l'Institut flamand pour la recherche technologique [VITO](#) — Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) à l'occasion de la sortie du guide.

Aujourd'hui, il n'existe pas de norme internationale régissant la mise hors service et le démantèlement des éoliennes terrestres : avec ce document d'orientation, WindEurope (Task Force for Dismantling and Decommissioning) ambitionne de contribuer à l'élaboration d'une telle norme industrielle, en présentant un aperçu complet des règles et réglementations relatives au démantèlement (y compris la gestion des déchets et la restauration des sites) en Europe (France, Danemark, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Espagne, Royaume-Uni), ainsi que les meilleures pratiques sur la façon de mettre hors service, accompagnées de recommandations pour le démantèlement, la découpe et la séparation sur site et la meilleure façon de charger et de transporter le matériel. Le guide couvre également les exigences en matière de santé et de sécurité. À cette fin, WindEurope a soumis le guide à la Commission électrotechnique internationale (IEC, International Electrotechnical Commission) et plus spécifiquement au comité technique (Technical Committee) [TC 88](#) (Wind energy generation systems) en vue de contribuer à l'amendement de la spécification technique 61400-28 CD relative à la fin de vie des éoliennes.

En France, prescriptions techniques applicables aux activités de démantèlement des éoliennes en fin de vie sont régies par l'[arrêté](#) du 26 août 2011 relatif 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 (cf. Section 7, Démantèlement, Article 29) — N. B. : l'[arrêté](#) du 26 août 2011 relatif à la remise en état et à la constitution des garanties financières pour les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent est abrogé depuis le 1^{er} juillet 2020.

Les opérations de démantèlement et de remise en état prévues à l'article [R515-106](#) du Code de l'environnement, qui s'appliquent également au démantèlement des aérogénérateurs qui font l'objet d'un renouvellement, comprennent :

- le démantèlement des installations de production d'électricité ;
- le démantèlement des postes de livraison ainsi que les câbles dans un rayon de 10 mètres autour des aérogénérateurs et des postes de livraison,
 - o dans le cadre d'un renouvellement dûment encadré par arrêté préfectoral, les postes de livraison ainsi que les câbles dans un rayon de 10 mètres autour des aérogénérateurs et des postes de livraison peuvent être réutilisés ;
- l'excavation de la totalité des fondations jusqu'à la base de leur semelle, à l'exception des éventuels pieux,
 - o par dérogation, la partie inférieure des fondations peut être maintenue dans le sol sur la base d'une étude adressée au préfet et ayant été acceptée par ce dernier démontrant que le bilan environnemental du décaissement total est défavorable, sans que la profondeur excavée ne puisse être inférieure à 2 mètres dans les terrains à usage forestier au titre du document d'urbanisme opposable et 1 m dans les autres cas,
 - o les fondations excavées sont remplacées par des terres de caractéristiques comparables aux terres en place à proximité de l'installation,
 - o dans le cadre d'un renouvellement dûment encadré par arrêté préfectoral, les fondations en place peuvent ne pas être excavées si elles sont réutilisées pour fixer les nouveaux aérogénérateurs ;
- la remise en état du site avec le décaissement des aires de grutage et des chemins d'accès sur une profondeur de 40 centimètres et le remplacement par des terres de caractéristiques comparables aux terres à proximité de l'installation, sauf si le propriétaire du terrain sur lequel est sise l'installation souhaite leur maintien en l'état.

Les déchets de démolition et de démantèlement sont réutilisés, recyclés, valorisés, ou à défaut éliminés dans les filières dûment autorisées à cet effet.

Au 1^{er} juillet 2022, au minimum 90 % de la masse totale des aérogénérateurs démantelés, fondations incluses, lorsque la totalité des fondations sont excavées, ou 85 % lorsque l'excavation des fondations fait l'objet d'une dérogation telle que prévue ci-avant, doivent être réutilisés ou recyclés.

Au 1^{er} juillet 2022, au minimum, 35 % de la masse des rotors doivent être réutilisés ou recyclés.

Les aérogénérateurs dont le dossier d'autorisation complet est déposé après les dates suivantes ainsi que les aérogénérateurs mis en service après cette même date dans le cadre d'une modification notable, doivent avoir au minimum :

- après le 1^{er} janvier 2024, 95 % de leur masse totale, tout ou partie des fondations incluses, réutilisable ou recyclable ;
- après le 1^{er} janvier 2023, 45 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable ;
- après le 1^{er} janvier 2025, 55 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable.

Lorsque les opérations de démantèlement et de remise en état sont achevées, l'exploitant doit faire attester par une entreprise agréée que les opérations visées ci-dessus ont été réalisées conformément aux prescriptions applicables. L'ensemble de ces dispositions sont en vigueur depuis le 1^{er} juin 2022.

Pour mémoire, dans la section (3.5.2.) consacrée à l'éolien terrestre, la programmation pluriannuelle de l'énergie (cf. [PPE](#), page 121) propose un schéma de développement de la capacité électrique du parc éolien français assorti de plusieurs recommandations visant à susciter une meilleure acceptabilité du déploiement de l'éolien terrestre, en particulier :

- rendre obligatoire d'ici 2023 le recyclage des matériaux constitutifs des éoliennes lors de leur démantèlement (recyclage) ;

- généraliser le principe d'une excavation totale des fondations éoliennes lors du démantèlement et augmenter le montant des garanties financières pour tenir compte des nouvelles technologies (démantèlement) ;
- favoriser la réutilisation des sites éoliens en fin de vie pour y réimplanter des machines plus performantes (repowering).

Gestion des déchets de béton - À l'échelle européenne, la plupart des pays européens n'ont pas de législation explicite relative aux fondations d'éoliennes, mais les déchets de béton (code 17 01 01 dans la nomenclature des déchets) appartiennent à la catégorie des déchets de construction et de démolition. En vertu de la directive-cadre relative aux déchets de l'Union européenne ([directive 2008/98/CE](#) — cf. article 11, Réemploi et recyclage), au moins 70 % en poids des déchets de construction et de démolition non dangereux doivent être réutilisés ou recyclés à partir de 2020.

En France, tous les déchets de démolition doivent être caractérisés selon qu'ils sont inertes, ou non inertes mais non dangereux, ou non inertes et dangereux, et être traités selon la hiérarchie des déchets (cf. Livre V, Titre IV, Déchets, du [Code de l'environnement](#)). Et selon l'article R515-106 du Code de l'environnement, les déchets de démolition et de démantèlement doivent être récupérés ou éliminés dans les filières dûment autorisées à cet effet.

Voir également supra, la loi Agec, à propos du devenir des éoliennes en fin de vie (béton).

Gestion des déchets de métaux - La directive européenne [2008/98/CE](#) (cf. article 10, Valorisation, paragraphe 2), stipule que « les déchets sont collectés séparément, pour autant que cette opération soit réalisable d'un point de vue technique, environnemental et économique, et ne sont pas mélangés à d'autres déchets ou matériaux aux propriétés différentes » et que « la collecte séparée est instaurée — en 2015 — au moins pour : le papier, le métal, le plastique et le verre » (cf. article 11, Réemploi et recyclage, paragraphe 1, alinéa 3). Les métaux provenant des éoliennes doivent donc être séparés. Le même article 11 (paragraphe 1, alinéa 2) stipule que « les États membres prennent des mesures pour promouvoir un recyclage de qualité et, à cet effet, mettent en place des collectes séparées des déchets lorsqu'elles sont réalisables et souhaitables d'un point de vue technique, environnemental et économique afin de respecter les normes de qualité nécessaires pour les secteurs concernés du recyclage ».

Cela est réglementé selon les articles [D543-282](#), (obligations des producteurs et détenteurs de déchets), [R541-50](#) (obligation de déclaration pour les acteurs de collecte ou de transport de déchets) et [R541-54-1](#) (négoce et courtage des déchets) du Code de l'environnement.

Gestion des déchets de composites - Les déchets de pales en matériaux composites sont le plus souvent classés dans la catégorie des déchets plastiques de construction et de démolition (code 17 02 03 dans la classification européenne des déchets). Le document d'orientation de WindEurope note qu'il n'existe que peu d'exigences réglementaires pour le secteur des déchets composites, en dépit d'une volonté politique vers plus de circularité (cf. [Circular economy action plan](#) de 2020). En Europe, seuls quatre pays font clairement référence aux déchets composites dans leur législation (Allemagne, Autriche, Pays-Bas, Finlande) — ces pays interdisant l'enfouissement ou l'incinération des composites.

Voir également supra, la loi Agec, à propos du devenir des éoliennes en fin de vie (plastiques). À cet égard, il convient de noter que l'[étude](#) publiée en mai 2019 par le ministère de la Transition écologique, sur les conditions d'émergence, en France, d'une économie circulaire dans la filière éolienne terrestre, préconisait l'introduction de la responsabilité élargie des producteurs (REP) pour le recyclage des pales (cf. recommandation n° 2) — principe selon lequel le fabricant, le distributeur ou encore l'importateur d'un produit sur le territoire (le metteur sur le marché) est tenu de prendre en charge la fin de vie de ce même produit. En France, la REP s'applique déjà dans plusieurs secteurs (véhicules en fin de vie, navires en fin de vie, pneumatiques usagés, médicaments non utilisés, etc.). La [loi](#) du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (Agec) a bien étendu la REP à de nouveaux produits (jouets, cigarettes, textiles pour la santé, matériaux de construction, etc.), mais les pales d'éoliennes ne figurent pas dans cette nouvelle liste — le législateur estimant que la REP pour les pales d'éoliennes serait inefficace pour stimuler le recyclage des pales.

Les pales peuvent-elles être enfouies ? En France, l'interdiction d'enfouissement n'est pas en tant que telle inscrite dans la loi mais découle des objectifs de recyclage fixés dans la réglementation car les éoliennes sont soumises à la réglementation ICPE, définie par l'arrêté (modifié) du 26 août 2011, qui comporte des obligations notamment en matière de recyclage et de réutilisation (cf. supra). En outre, la loi Agec prévoyant une interdiction, à partir du 1^{er} janvier 2022, de l'enfouissement des déchets

valorisables, les pales d'éoliennes ne peuvent pas être enfouies légalement en France, sauf à ce que la preuve soit apportée qu'aucune autre solution n'est envisageable. Comme la valorisation en combustibles solides de récupération (CSR) est possible, cela empêche de facto l'enfouissement. L'Association européenne de l'énergie éolienne [WindEurope](#) a lancé à la mi-juin 2021 un [appel](#) aux dirigeants des pays de l'Union européenne visant à interdire, d'ici à 2025, l'enfouissement des pales — interdiction déjà en place dans plusieurs pays (Autriche, Finlande, Allemagne, Pays-Bas).

Gestion des déchets de terres rares - Les éléments relevant du groupe des terres rares utilisés dans la fabrication des aimants permanents sont le néodyme (Nd), le terbium (Tb), le dysprosium (Dy) et le praséodyme (Pr). Les aimants en néodyme-fer-bore (Nd₂Fe₁₄B) sont utilisés dans les éoliennes. Ces aimants contiennent généralement 29 % de néodyme et 1 à 1,5 % de dysprosium. Les terres rares sont répertoriées comme déchets non dangereux. À ce jour, il n'existe pas de législation européenne ou nationale spécifique relative aux terres rares — selon le document d'orientation de WindEurope.

Gestion des déchets de câbles électriques - La [directive 2012/19/UE](#) du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE, cf. article 2, Champ d'application, paragraphe 4c) stipule que « la présente directive ne s'applique pas aux grosses installations fixes, à l'exception de tout équipement qui est présent dans de telles installations, mais n'est pas spécifiquement conçu et monté pour s'intégrer dans lesdites installations ». En vertu de l'annexe VII de cette directive, les « câbles électriques extérieurs » « doivent être extraits de tout DEEE faisant l'objet d'une collecte séparée » et être « éliminés ou valorisés conformément à la directive 2008/98/CE ».

Gestion des déchets d'huiles usagées - La directive 2008/98/CE (cf. article 21, Huiles usagées) stipule que les huiles usagées doivent être collectées séparément, lorsque cela est techniquement possible, et traitées conformément à l'ordre de priorité des déchets (cf. article 4, Hiérarchie des déchets) et sans danger pour la santé humaine et l'environnement (cf. article 13, Protection de la santé humaine et de l'environnement). Par ailleurs, lorsque cela est techniquement faisable et économiquement viable, les huiles usagées dotées de caractéristiques différentes ne doivent pas mélangées entre elles, ni les huiles usagées avec d'autres déchets ou substances, si un tel mélange empêche leur traitement. Les États membres peuvent en outre appliquer des mesures supplémentaires telles que des exigences techniques, la responsabilité des producteurs, des instruments économiques ou encore des accords volontaires.

En France, la gestion des huiles usagées est réglementée par les articles [R543-3 à R543-13](#) du Code de l'environnement (les articles R543-14 à R543-15 ont été abrogés par décret le 27 octobre 2021).

Repowering

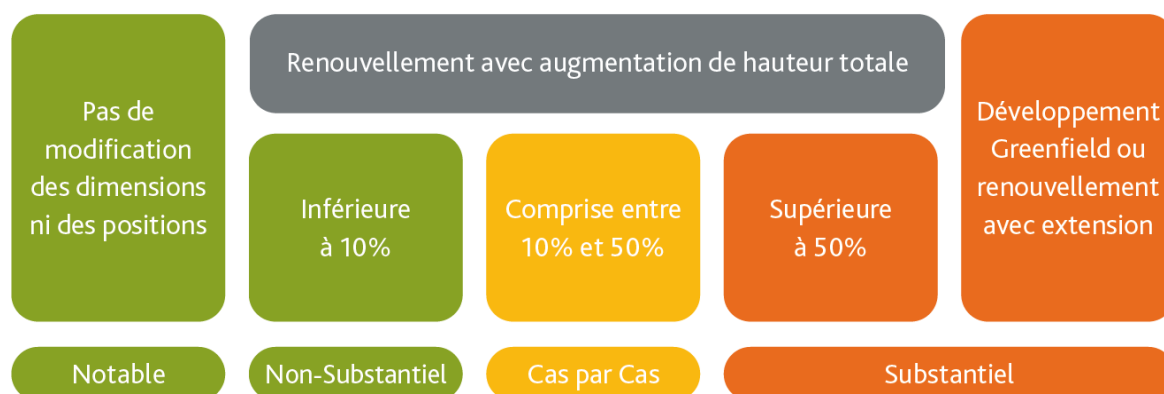
Dans cet [article](#) paru le 12 octobre 2020 dans Le Monde de l'Énergie, Christophe Soulier¹², alors responsable repowering chez [RES](#), rappelait l'intérêt économique du repowering. En France, les projets de repowering sont éligibles à un contrat d'achat (contrat dit de complément de rémunération) par [EDF OA](#) (EDF Obligation d'Achat, filiale d'EDF qui achète l'électricité aux exploitants de parcs) de 20 ans (durée maximale), dans la même compétition (appels d'offres de la CRE — Commission de régulation de l'énergie) que les projets dits neufs. Les parcs éoliens au-delà de 15 ans ont encore de la valeur mais ils souffrent à la fois d'une durée de vie résiduelle limitée, et d'un prix de vente de l'électricité incertain, suite à la fin de leur contrat avec EDF OA — les parcs éoliens en fin de contrat d'achat (15 ans) peuvent souvent fonctionner 5 à 10 ans supplémentaires, mais pas sans renouvellement (repowering), qui permet d'augmenter la production d'électricité renouvelable. D'où l'intérêt pour les exploitants d'obtenir au plus tôt les autorisations administratives de repowering pour sécuriser l'avenir de leur parc, non seulement s'agissant de la durée de vie des installations mais également du prix de vente de l'électricité produite avec une visibilité sur 20 ans. Cette sécurité dans la vente d'électricité, couplée à une augmentation significative de la production (facteur 2 en moyenne, voire 4 pour les meilleurs projets de RES) en installant des turbines plus grandes, permet d'augmenter la valeur des parcs éoliens. À l'issue de leurs 20 premières années de fonctionnement, les contrats d'achat d'électricité signés par les premiers parcs éoliens avec EDF OA prendront fin : en France, 6 GW seront concernés en 2025, 10 GW en 2030.

¹² Christophe Soulier, responsable repowering chez RES France jusqu'en janvier 2021, est actuellement directeur construction chez [Vensolair](#), à Montpellier.

Comme cela a été vu plus haut, à propos des projets de repowering, l'entreprise RES indiquait dans son [Guide du repowering](#), publié en 2022, que lorsque les parcs éoliens sont proches de leur fin de vie, trois options sont envisageables :

- Run To Destruction (RTD) : il s'agit d'opérer le parc éolien sans apporter de maintenance préventive ou curative lourde jusqu'à la fin de vie technique des éoliennes ;
- Life extension (LE) : il s'agit d'étendre la durée de vie technique des éoliennes par le changement de composants majeurs ou mineurs, dans l'idée d'améliorer leur performance ;
- Repowering : il s'agit de remplacer les éoliennes en opération par de nouvelles éoliennes plus performantes.

RES indiquait également que les deux premières alternatives (RTD et LE) ne nécessitent aucune autorisation supplémentaire, exception faite d'un renouvellement des baux fonciers si ces derniers sont arrivés à échéance. En revanche, il est nécessaire que l'administration délivre une nouvelle autorisation pour le remplacement des éoliennes existantes. La démarche à suivre et le taux de succès dépend du type de renouvellement envisagé et donc de la nature des modifications (cf. illustration ci-après).



Critères d'appréciation du caractère substantiel de la modification d'un projet de repowering (source : [RES](#), 2022).

L'[instruction](#) du Gouvernement du 11 juillet 2018 relative à l'appréciation des projets de renouvellement des parcs éoliens terrestres permet de préciser les notions suivantes :

- renouvellement à l'identique ou « notable » :
 - o les éoliennes actuelles sont remplacées par des éoliennes de dimensions similaires (augmentation inférieure à 10 %) et aux emplacements actuels,
 - o la demande d'autorisation de ces type de renouvellements, se fait via la rédaction d'un porter à connaissance justifiant de l'absence d'augmentation d'impact des nouvelles éoliennes :
 - le détail des études (acoustiques, paysagères, étude de danger...) est laissé à l'appréciation du porteur de projet selon l'ampleur de la modification,
 - seul un suivi environnemental de moins de 3 ans et compatible avec le nouveau protocole biodiversité de 2018 est obligatoirement demandé par l'administration,
 - o durée du process entre le lancement des études de renouvellement et la mise en service du parc renouvelé : 2-3 ans ;
- renouvellement non-substantiel (NS) :
 - o les éoliennes actuelles sont remplacées par des éoliennes de dimensions légèrement supérieures (augmentation hauteur totale entre 10 et 50 %) et/ou sont légèrement déplacées de leurs positions actuelles,
 - o dossier de demande : idem supra (cas « notable »),
 - o durée du process entre le lancement des études de renouvellement et la mise en service du parc renouvelé : 4-5 ans ;
- renouvellement substantiel (S) :

- les éoliennes actuelles sont remplacées par des éoliennes de dimensions considérablement supérieures (supérieur à 50 %) et/ou sont considérablement déplacées,
- le porteur de projet doit alors déposer une demande d'autorisation environnementale complète comme pour un nouveau projet,
- durée du process entre le lancement des études de renouvellement et la mise en service du parc renouvelé : 6-7 ans.




Ainsi, la réglementation prévoit qu'en cas de « modification substantielle » des installations qui relèvent de l'autorisation environnementale, une nouvelle autorisation doit être délivrée — comme pour un nouveau parc éolien.

Pour préciser la notion de « modification substantielle », le ministère en charge de la Transition écologique a défini des critères d'appréciation du caractère substantiel de la modification d'un projet en distinguant [5 configurations](#) possibles de renouvellement :

- I - Remplacement des éoliennes par un autre modèle de dimensions identiques, au même emplacement = modification notable mais non substantielle ;
- II - Remplacement, au même emplacement, par des éoliennes de même hauteur hors tout (mât, nacelle et pale à la verticale), mais avec des pales plus longues = selon appréciation des services de la préfecture ;
- III - Remplacement, au même emplacement, par des éoliennes plus hautes = selon appréciation des services de la préfecture ;
- IV - Remplacement et déplacement des éoliennes = selon appréciation des services de la préfecture ;
- V - Ajout de mâts = modification substantielle.

Dans cet [article](#) publié par Sia Partners le 16 mars 2020, le cabinet de conseil rappelle qu'au cours des années 2020, presque 10 GW de capacité de production d'éolien terrestre ne pourront plus bénéficier des tarifs d'obligation d'achat, accordés jusqu'en 2016 aux nouveaux projets, pour une durée de 15 ans et s'interroge sur les suites à donner aux 1 000 contrats d'obligation d'achats qui expireront avant 2030.

La durée de vie théorique des parcs étant généralement comprise entre 20 et 25 ans, le maintien en activité des installations à l'issue de la période couverte (15 ans) par un mécanisme d'obligation d'achat est a priori envisageable, car les équipements en bon état de fonctionnement et amortis laissent envisager sans prise de risques des résultats nets positifs sur les 5 à 10 ans de durée de vie supplémentaires théoriques des installations. Comment, alors, le repowering peut-il apparaître comme un levier de maximisation des gains, en comparaison à un scénario de maintien en activité des parcs dans leur configuration actuel ? Le modèle économique des parcs connaît une dégradation dans le temps. En premier lieu, et ce de manière soudaine, le passage d'une rémunération par la vente d'électricité à un tarif d'achat à la vente aux prix du marché entraîne, à production constante, une baisse significative du chiffre d'affaires des exploitations. Par ailleurs, du côté des coûts, les dépenses d'exploitation augmentent par la suite progressivement du fait du vieillissement des installations. Les besoins plus fréquents de remplacement des pièces et le nombre accru d'interventions des techniciens pèsent sur les coûts de maintenance. Le tableau ci-après présente de manière synoptique les avantages et inconvénient — du point de vue de l'exploitant d'un parc éolien — des différentes options envisageables à la sortie d'un parc d'un mécanisme d'obligation d'achat.

	 Modèle d'affaires	 Aspects réglementaires	 Développement des capacités de production
Option 1 : Repowering immédiat*	<ul style="list-style-type: none"> + Bénéfice immédiat d'un nouveau soutien public via un complément de rémunération + Installations d'équipements plus performants - Risques inhérents à tout nouveaux projets (surcoûts, délais, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> + Si le projet ne connaît pas de modification substantielle, pas de nécessité d'obtention d'une nouvelle autorisation environnementale - Nouvelles exigences réglementaires : risque qu'un projet autorisé il y a 15 ans ne puisse plus l'être aujourd'hui 	<ul style="list-style-type: none"> + Meilleure acceptabilité de la filière, à capacité donnée (sites moins nombreux et situés près de populations habituées à la présence d'éoliennes) - Moindres ressources disponibles de l'exploitant pour la construction de nouveaux parcs, dont les capacités s'additionneraient aux parcs existants
Option 2 : Exploitation du parc jusqu'à sa fin de vie puis repowering*	<ul style="list-style-type: none"> + Rente liée à l'usage d'installations déjà amorties - Incertitudes sur les modalités futures de soutien à la filière - Hausse constante des coûts de maintenance, et donc réduction progressive des bénéfices 	<ul style="list-style-type: none"> + Au lancement du projet de repowering, avantages et risques similaires à l'option 1 	<ul style="list-style-type: none"> + Avantages similaires à l'option 1 après mise en œuvre du projet de repowering - Stagnation des capacités de production jusqu'à la fin de vie du parc existant, voire au-delà selon les caractéristiques du projet de repowering
Option 3 : Construction immédiate d'un parc sur un nouvel emplacement, tout en maintenant l'exploitation du parc existant jusqu'à sa fin de vie*	<ul style="list-style-type: none"> + Mêmes avantages option 1 + Rente liée à l'usage d'installations déjà amorties sur le parc existant - CAPEX supplémentaires par rapport aux options 1 et 2 (études, génie civil et raccordement = 22% des CAPEX nouveaux projets) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nouvelles procédures à lancer pour l'obtention des autorisations liées à la construction d'un nouveau parc 	<ul style="list-style-type: none"> + Addition des capacités de production du nouveau et de l'ancien parc à court terme - Risques liés à l'acceptabilité des projets sur de nouveaux territoires d'implantation
Option 4 : Remplacement des certains composants des installations du parc pour allonger sa durée de vie (= revamping)	<ul style="list-style-type: none"> + Risques moindres par rapport aux options 1 et 3 - Pas de complément de rémunération - Possibilités réduites de bénéficier des dernières innovations dans la filière 	<ul style="list-style-type: none"> + Cas le moins contraignant 	<ul style="list-style-type: none"> - Cas le plus limitant du point de vue de l'augmentation des capacités totales de la filière éolienne

* Options présentées comme concurrentes pour simplification. En pratique cependant, possibilité pour les exploitants de construire un parc éolien sur un nouveau site, indépendamment des décisions prises quant au devenir du parc concerné par la fin de la période couverte par un contrat d'achat (sous réserve de la disponibilité des ressources nécessaires pour conduire plusieurs projets en parallèle)
Source : Analyse Sia Partners

Les différentes stratégies de renouvellement d'un parc éolien : avantages et inconvénient (source : [Sia Partners](#), 2020).

Sur la période 2020-2030, ce sont près de 1 000 contrats d'obligation d'achat qui arriveront à terme et seront donc concernés par ces évolutions, correspondant en moyenne environ à 1 GW de capacité de production chaque année, avec des pics en 2024, 2025 (environ 1,4 GW pour chacune de ces années) et en 2030 (plus de 1,2 GW), comme l'indique la [délibération n° 2019-192](#) de la Commission de régulation de l'énergie du 24 juillet 2019 portant avis sur le projet d'arrêté modifiant l'arrêté du 6 mai 2017 fixant les conditions du complément de rémunération de l'électricité produite par les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent, de six aérogénérateurs au maximum.

Certains exploitants de parcs éoliens, encouragés par les retours d'expériences de la part d'énergéticiens témoignant de l'intérêt pour la pratique du repowering et de son potentiel dans le développement des capacités de production d'électricité renouvelable dans certains pays européens (Allemagne, Pays-Bas, etc.), peuvent faire le choix de réinvestir immédiatement pour équiper ces sites d'aérogénérateurs plus performants dans le cadre de projets éligibles à un complément de rémunération. Cependant, malgré ses avantages et son potentiel de levier dans l'accroissement des capacités installées, la pratique du repowering apparaît contestable lorsqu'elle s'applique à des parcs encore en état de fonctionner (moyennant certes des travaux d'entretien, réparation et maintenance) et dont la construction a été favorisée grâce à un soutien public. Dès 2019, des critiques ont émergé en France contre des décisions de repowering conduisant à la désinstallation jugée prématurée d'éoliennes — cf. la [délibération n° 2019-192](#) de la CRE citée plus haut, qui estimait que les parcs

« produisent jusqu'à leur limite technique » et recommandait d'« interdire à tout site qui a bénéficié d'un soutien dont la date de prise d'effet remonte à moins de 20 ans de bénéficier d'un nouveau soutien ».

Avec la mise en place en 2017 de nouvelles modalités de soutien aux projets éolien terrestre par complément de rémunération (cf. supra), qui s'appliquent sur une durée de 20 ans (et non plus de 15 comme dans le cas des projets ayant été soutenus via un contrat d'achat), l'administration a souhaité encourager le maintien en activité sur une longue durée des parcs à venir, dans l'hypothèse où des problématiques de renouvellements se poseraient dans la décennie 2040. Mais cette période de 20 ans reste de toute façon inférieure à la durée de vie théorique — de l'ordre de 25 à 30 ans — des installations actuellement construction.

Contemporains de l'article de Sia Partners (ci-avant), à consulter également cet [article](#) (en libre accès) d'Adrien Fourmon, avocat à la Cour, spécialisé en droit public et en énergies renouvelables au cabinet Jeantet AARPI (Association d'avocats à responsabilité professionnelle individuelle), paru dans l'Usine Nouvelle le 29 août 2020, sur le cadre réglementaire et contractuel relatif au renouvellement (repowering) des parcs éoliens terrestres en France et auquel les opérateurs doivent se conformer, ainsi que cet autre [article](#) d'Adrien Fourmon, paru dans Le Monde de l'Énergie le 15 septembre 2020, sur les ambitions et contraintes relatives au renouvellement (repowering) des parcs éoliens.

1.1.5 - Chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes

Cette partie vise à fournir une description de la chaîne séquentielle des opérations relatives à la fin de vie des éoliennes, depuis la mise hors service d'un parc éolien jusqu'aux différentes voies de démantèlement, de réemploi, de réutilisation, de recyclage et valorisation des divers éléments constitutifs des éoliennes, en indiquant les principaux acteurs et parties prenantes positionnés sur les différents maillons de cette chaîne de valeur.

Selon cette fiche d'[Engie Green](#) (mars 2022), consacrée au démantèlement et au recyclage d'un parc éolien terrestre, une éolienne est démontée en une journée, les travaux de démantèlement comprenant la séquence d'étapes suivante :

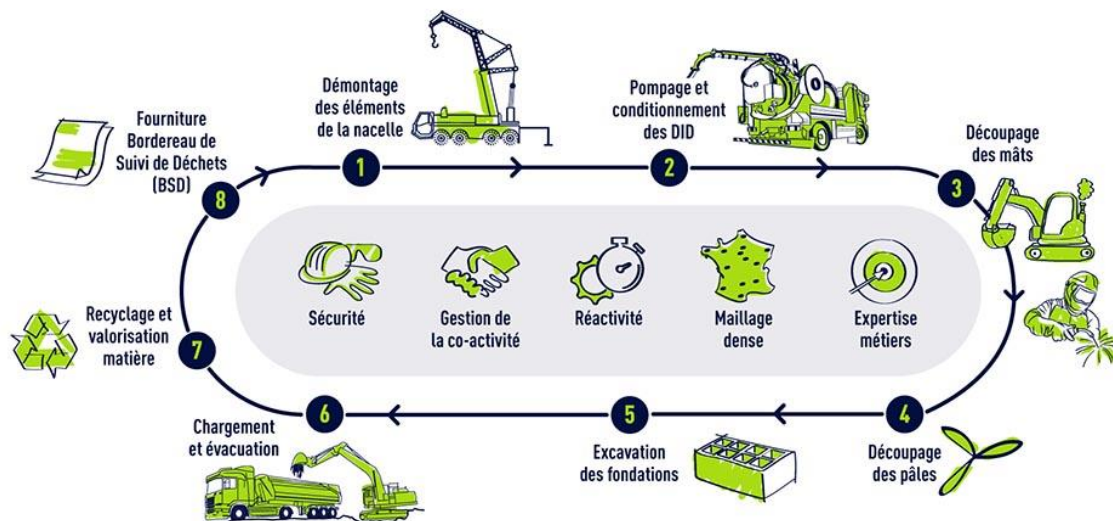
- installation du chantier ;
- découplage du parc ;
- démontage proprement dit (à grandes masses, une éolienne est composée de 60 % de béton, 35 % d'acier et 5 % de matériaux composites) ;
- évacuation et traitement de tous les éléments constituant les éoliennes ;
- excavation totale des fondations — ou seulement partielle si une étude environnementale démontre un impact négatif (l'excavation reste toutefois obligatoire sur 2 m pour les sols à usage forestier et 1 m dans les autres cas).

Autre exemple emblématique, celui de [Suez](#), l'entreprise se chargeant, avec des partenaires, de l'organisation des différentes étapes du levage et du démontage en hauteur des pales, de la nacelle puis au sol, du tri des différentes matières avant expédition vers les filières de valorisation jusqu'à la démolition des fondations.

Pour chaque chantier de démantèlement, de Suez construit un « parc écoindustriel » où les entreprises coopèrent pour optimiser la valorisation des déchets. Après toutes ces étapes de levage et de démantèlement, Suez opère un tri des différents composants : acier, câbles, déchets électriques, fibres de verre, DIB, DID, transformateur et moteur.

Suez s'appuie ensuite sur ses propres filières de valorisation et de commercialisation, ainsi que sur celles de ses partenaires. Toutes les matières une fois triées sur le parc sont identifiées et tracées jusqu'à leur recyclage afin d'établir un bilan matières complet remis au gestionnaire du parc.

Hors fondations, la valorisation d'une éolienne atteint 99 % dont 98 % en recyclage matière. Le pourcent restant correspondant aux huiles de vidanges et hydrauliques, graisses, chiffons souillés, aérosols, etc. Suez fournit une traçabilité complète de chaque éolienne déconstruite.



Chaîne de valeur du démantèlement et de la valorisation des éoliennes (source : [Suez, 2022](#)).

Suez a notamment opéré la déconstruction de 5 éoliennes sur le parc d'[Engie Green](#) à Port-la-Nouvelle (Aude, Occitanie) en août 2019 et novembre 2020. Sur ce chantier de démantèlement, Suez est intervenu sur le process de tri et de valorisation matière et énergétique. Chaque pièce démantelée a été triée, l'objectif étant de maximiser ce tri pour optimiser leur valorisation et leur recyclage. À l'issue de chaque démantèlement, Suez fournit à Engie Green un bilan matières détaillé avec le volume et la filière de valorisation matière ou énergétique. Par exemple, l'armoire électrique avec les autres déchets électroniques sont valorisés dans l'usine de Suez DEEE à Feyzin (métropole de Lyon, Auvergne-Rhône-Alpes). Les métaux sont pris en charge par la filiale de Suez Boone Comenor Metalimpex et les câbles par une autre entité du groupe spécialisée dans le recyclage des câbles. Chaque flux est tracé et le client a accès à chaque Bordereau de suivi de déchet.

Dans son cahier des charges, Engie Green avait préconisé une valorisation globale de 97 % et le bilan matière fait état, à la 2^e campagne de démantèlement (2020), de 99 % de valorisation dont 98 % en recyclage et 1 % en enfouissement. Même les pales éoliennes sont valorisées pour devenir des panneaux d'isolation ou du béton fibré. Quant aux socles en béton, une fois triés, concassés et déferrailés, ils sont réutilisés sous la forme de granulats dans le secteur de la construction.

COVERWIND
Supervision du chantier et main d'œuvre des travaux

SUEZ
Traitement et valorisation des déchets

LAVOYE
Terrassement et découpe des composants

MARTIN LEVAGE
Levage, manutention, transport, stockage

RECICLALIA
Traitement et valorisation des pales et des éléments en fibre de verre

Entreprises mobilisées sur le chantier de démantèlement de Port-la-Nouvelle (source : [Engie Green](#), 2019).

Le [chapitre 7](#) (Le projet en fin de vie et en phase de démantèlement) de la demande d'autorisation environnementale ([document complet](#) datant de février 2020, téléchargé depuis le site Internet de la préfecture de la Marne) relative au projet éolien de Fère-Champenoise (Marne, Grand Est) — Demande de PC et d'exploiter au titre des ICPE faite par l'entreprise allemande [Green Energy 3000](#) — fournit des indications précises quant à l'enchaînement des opérations.

Ainsi, selon ce document, les travaux de démantèlement (démontage des installations) et la remise en état du site sont relativement rapides et aisés et se déroulent sur 5 phases ou étapes principales, présentées synthétiquement ci-après :

- installation du chantier :
 - o mise en place du/des panneau(x) de chantier,
 - o aménagement d'une base de vie, mise en place des dispositifs de sécurité et du balisage de chantier autour des éoliennes,
 - o aménagement de zones de tri (DEEE, etc.) pour faciliter le transport vers les sites de valorisation des déchets ;
- découplage du parc :
 - o mise hors tension du parc au niveau des éoliennes,
 - o mise en sécurité des éoliennes par le blocage de leurs pales,
 - o rétablissement du réseau de distribution initial, dans le cas où Enedis ne souhaiterait pas conserver ce réseau,
 - o suppression des câbles dans un rayon de 10 mètres autour du poste de livraison et des éoliennes ;
- démontage des éoliennes et des équipements annexes, selon une procédure inverse de celle du montage :
 - o démantèlement des structures de livraison :
 - démantèlement des fondations en béton du poste de livraison avant transport pour concassage du béton dans un centre de traitement agréé,

- démantèlement des équipements électriques principaux composants du poste de livraison et majoritairement valorisables (filière agréée, notamment les DEEE),
 - démontage des éoliennes :
 - dans un premier temps, les pales, les rotors et les nacelles sont mis au sol,
 - les tours sont ensuite démontées, section par section,
 - l'ensemble de ces éléments est évacué vers des centres de traitement adaptés pour tous les composants recyclables de l'éolienne,
 - le transformateur situé dans la nacelle, comporte un bac de rétention pour l'huile : l'huile récupérée est envoyée vers des filières de traitements agréées ,
 - retrait du système de parafoudre enfoui auprès de chaque éolienne ;
- démantèlement et destruction des fondations :
 - retrait d'une hauteur suffisante de fondation permettant le passage éventuel des engins de labours et la pousse des cultures,
 - les assises structurelles (ferraillage) sont retirées par découpage au chalumeau, puis acheminées vers une filière agréée (ferrailleur par exemple),
 - procédé :
 - la terre recouvrant la fondation est ôtée et déposée en andain à l'arrière de la fondation et servira à combler l'excavation de terre végétale — l'éventuel excédent sera valorisé auprès d'un agriculteur local ou revendu,
 - la fondation béton est détruite au brise-roche hydraulique (pelle mécanique avec un marteau piqueur), qui démolit la fondation en différents blocs,
 - les parties métalliques sont déboulonnées, puis cisailées,
 - les déchets de démolition propres sont acheminés vers les filières agréées, le béton démolit transporté vers un centre de traitement adapté pour concassage et broyage,
 - l'excavation est recouverte de terre et la surface remise en état (plantation d'un semis, d'une culture ou de plantations en conformité avec le plan de gestion de la parcelle et le propriétaire) ;
- remise en état du site :
 - décaissement des aires de grutage et des chemins d'accès sur une profondeur de 40 cm (cf. cadre réglementaire)
 - les étapes de la remise en état sont principalement :
 - le nettoyage du chantier (retrait des aires de grues, transports des engins de chantier, etc.),
 - le désempierrement des chemins d'accès aux éoliennes, si les propriétaires le souhaitent,
 - la remise en état des plateformes et pistes devenues inutiles avec réensemencement permettant, en accord avec le propriétaire et le gestionnaire, de restaurer les milieux initiaux (cultures ou plantations forestières).

L'entreprise Green Energy 3000 fournit en outre le bilan matières (prévisionnel) suivant :

- pales : près de 40 tonnes par éolienne de matériaux composites (résine et fibres de renfort), broyés pour faciliter le recyclage (sans dire comment) ;
- nacelle : environ 70 tonnes de différents matériaux (acier, cuivre — facilement recyclables — et matériaux composites — traités séparément) ;
- mât : plusieurs centaines de tonnes d'acier (en l'occurrence, entre 228 et 313 tonnes) et échelles en aluminium à l'intérieur du mât ;
- transformateur et installations de distribution électrique : chacun de leurs éléments respectifs est récupéré et évacué conformément à l'ordonnance sur les déchets électroniques ;
- fondation : détruite sur une profondeur de 30 centimètres à 2 mètres, conformément à l'article 1 de l'arrêté du 26 août 2011.

Selon ce [document](#) publié en juin 2021 par le cluster [Cemater](#)¹³ sur le démantèlement, le recyclage et le renouvellement des parcs éoliens en Occitanie, les secteurs d'activités des entreprises qui interviennent sur une opération de démantèlement de parc éolien sont de plusieurs types, à savoir :

- bureaux d'études spécialisés ;
- entreprises de terrassement et de travaux publics (remise en état des accès, pistes et plateformes de levage, remise en état finale du site) ;
- métiers de l'électricité (démantèlement des systèmes de raccordement) ;
- métiers de levage (entreprises de montage/démontage d'éoliennes associées aux spécialistes du transport et du levage pour le démontage) ;
- métiers de démolition ;
- métiers de valorisation et de recyclage.

À date de la rédaction de ce document, le territoire de la région Occitanie compte (chiffres clés) :

- 124 parcs éoliens en service ;
- 803 éoliennes en service ;
- 1 466 MW de puissance électrique éolienne installée (objectifs du scénario RÉPos pour l'éolien terrestre : 3,6 GW en 2030 et 5,5 GW en 2050) ;
- 26 projets de renouvellement des parcs éoliens arrivés en fin de vie ;
- 74 parcs (743 MW) sont sortis du mécanisme de l'obligation d'achat de l'électricité et potentiellement soumis à démantèlement d'ici 2025.

Pour le Cemater, la proximité des acteurs avec le chantier de démantèlement est essentielle dans la perspective de limiter l'empreinte carbone, ainsi que les coûts d'une telle opération.

Les produits et matières générés et traités par les entreprises dans le cadre de ces chantiers de déconstruction en Occitanie sont ceux déjà cités plus haut, en particulier :

- nacelle : polymères renforcés à la fibre de verre, acier, autres métaux, DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques), huile, DIB (déchets industriels banals — déchets qui ne sont ni inertes ni dangereux et qui ne sont générés ni par les ménages ni par le secteur du BTP) ;
- pales : polymères renforcés à la fibre de verre ou de carbone ;
- hub (nez — pales et hub constituent le rotor) : polymères renforcés à la fibre de verre, acier ;
- mâts et câbles : acier (ou acier/béton pour quelques mâts hybrides), autres métaux ;
- fondations : béton, ferraille.

Enfin, cette [note](#) disponible sur le site Internet de la préfecture de la Creuse (Nouvelle-Aquitaine) cite le retour d'expérience d'[EDF Renouvelables](#), assurant la maîtrise d'ouvrage déléguée du démantèlement du parc éolien (10 aérogénérateurs, puissance totale de 7,5 MW) de Sallèles-Limousis (Aude, Occitanie). EDF Renouvelables a travaillé avec plusieurs entreprises dont deux sociétés locales :

- [Cegelec](#) (groupe Vinci) : entreprise principale pour les travaux de démantèlement ;
- [Mediaco](#) : levage et transport ;
- [Sotradem](#) : travaux de démolition des fondations ;
- [AFM Recyclage](#) (groupe Derichebourg, à Carcassonne) : traitement des déchets ;
- [Entreprise Gros](#) (à Villeneuve-Minervois) : travaux de terrassement et de remise en état du site.

Ce chantier d'une durée cumulée d'environ deux mois, a consisté à démonter les éoliennes puis à remettre le site à l'état naturel. Dans ce cadre, EDF Renouvelables affirme porter une attention particulière aux déchets tout au long du chantier : tous les déchets traités et/ou revalorisés dans des centres d'élimination et de valorisation agréés et adaptés à chacun d'eux (Déchets Non Dangereux, huiles usagées, déchets inertes...).

¹³ Cemater est une association qui fédère les professionnels (plus de 80 entreprises) de la filière des énergies renouvelables et de la construction durable en Occitanie. Nommé expert par la Région, Cemater pilote la structuration des filières énergies renouvelables et construction durable en Occitanie et accompagne la démarche [RÉPos](#) de la Région.

1.1.6 - Opérations de démantèlement des éoliennes

Cette partie vise à renseigner diverses questions opérationnelles relatives au démantèlement de chacun des constituants des éoliennes en fin de vie, en particulier :

- le déferrailage des massifs de fondation, le broyage des bétons, l'élaboration de granulats ;
- la découpe des mâts et le recyclage des métaux ;
- le démantèlement de la nacelle, avec récupération des métaux et le démontage des aérogénérateurs avec récupération des aimants permanents ;
- le démantèlement des pales, le découpage (avec prise en compte des problèmes d'émissions de poussières), puis le stockage des matériaux composites à base de résines thermodurcissables (époxy ou polyester) et renfort de fibres (verre ou carbone).

Cette partie vise également à recenser les divers moyens techniques (infrastructures à bâtir par exemple plateformes, équipements nécessaires par exemple grues), humains (ressources humaines, compétences requises) et financiers (coûts associés) qui sont requis et mis en œuvre sur site pour des opérations de démontage et démantèlement, préalablement au recyclage et à la valorisation des différents éléments.

Éoliennes terrestres

Selon les auteurs du [rapport](#) (déjà cité plus haut) du CGEDD/CGEJET) de mai 2019, les opérations de démantèlement et de démontage des éoliennes font appel à des techniques disponibles sur le marché français (levage, grutage, transport exceptionnel, etc.), et la majorité des matériaux entre dans des filières de collecte, tri, réutilisation voire recyclage structurées et identifiées (béton, métaux ferreux et non ferreux, matériels électriques et électroniques, etc.). Citant France énergie éolienne (et adhérents), les auteurs de ce rapport précisent que les opérateurs français privilégient le démontage par grue et que, citant le Syndicat des énergies renouvelables (Ser), les retours d'expériences des premiers projets démantelés par les entreprises adhérentes du Ser indiquent que le montant de la garantie financière de démantèlement (50 000 € par éolienne), additionné aux revenus issus de la revalorisation des matériaux, permet de couvrir l'ensemble des coûts de démantèlement et de remise en état du site — un point de vue que partage France énergie éolienne, qui considère la provision de 50 k€ suffisante.

L'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)) avait déjà organisé, le 21 mai 2019 à Paris, un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire). À cette occasion, Maxime Dupuis, directeur de projet chez [Kallista Energy](#), a présenté des premiers [retours d'expérience](#) avec le démantèlement en 2017 (avant repowering) des quatre éoliennes du parc de Plouyé (Finistère, Bretagne). Selon Kallista Energy, le démantèlement est un processus à rebours du processus d'assemblage, débutant avec le démontage et la mise au sol de tous les éléments verticaux (rotors, nacelles, mâts) à l'aide de grues (cf. photo ci-après). Un point de vue partagé par les dirigeants de Q Energy (déjà cités plus haut), selon qui les opérations de démantèlement des éoliennes sont réalisées dans une séquence inverse du processus d'assemblage, préalablement aux travaux au sol (démontage, tri, évacuation vers les centres de traitement) — à la connaissance de Q Energy, il ne paraît pas y avoir de prise en compte des problèmes d'émissions de poussières (broyage, découpe à la scie, découpe à la pince) ou de dégagements de fumées (découpe au chalumeau) lors de la manipulation et du traitement des pales ; Q Energy indique également qu'une plateforme temporaire en matériaux concassés est construite, sur laquelle sont apportés les différents éléments démontés pour y être démantelés et triés à la source pour le recyclage.



Les rotors sont entièrement déconstruits au sol et les pales grossièrement découpées à la pince (réduction du volume à transporter) avant leur évacuation en déchetterie (cf. photo ci-après).



Les nacelles sont transportées directement au centre de recyclage (cf. photo ci-après).



Les mâts sont tronçonnés au chalumeau pour faciliter leur transport vers le centre de recyclage (cf. photos ci-après).



Enfin, les fondations sont entièrement excavées, les déchets de béton et les ferrailles séparés et triés en vue de leur traitement dans un centre de recyclage (cf. photos ci-après), préalablement à la remise en état et au réaménagement (installation d'équipements touristiques) du site en accord avec les propriétaires fonciers et la mairie.



Selon Kallista Energy, les opérations de démantèlement ont été réalisées avec des entreprises locales lorsque cela était possible, dans le cadre d'un partenariat avec le fabricant allemand d'éoliennes Enercon, à travers un projet clé en main et l'accompagnement des divers prestataires spécialisés. Dans ce cas précis, Kallista Energy revendique une revalorisation de l'éolienne à 100 %, avec en particulier (bilan) :

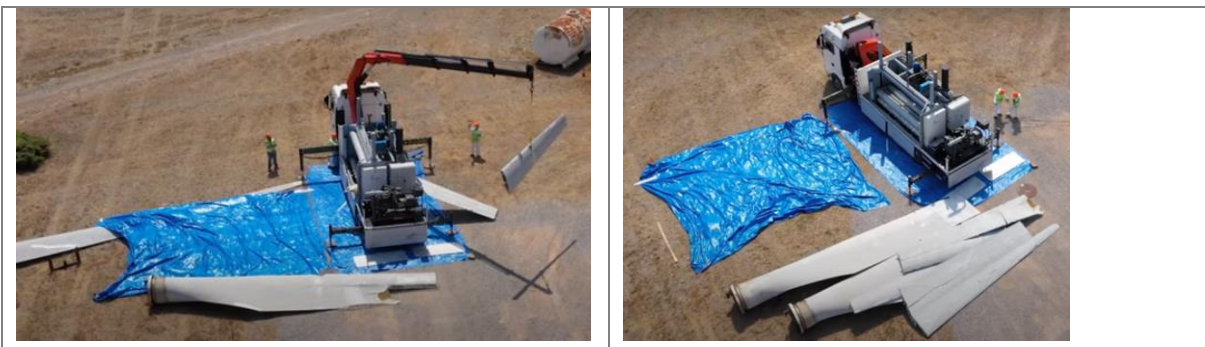
- les nacelles et moyeux :
 - o une nacelle a été envoyée dans un lycée technique en Bretagne,
 - o les pièces en acier et métal ont été broyées, triées et recyclées,
 - o la fibre de verre a été utilisée comme combustible solide de récupération (CSR),
 - o armoire et câbles ont été broyés, triés et recyclés ;
- les pales :

- la fibre de verre a été utilisée comme combustible solide de récupération (CSR) ;
- les mâts :
 - pièces en acier et métal ont été broyées, triées et recyclées,
 - plates-formes, armoire et câbles ont été broyés, triés et recyclés ;
- les fondations :
 - les ferrailles ont été broyées, triées et recyclées,
 - le béton a été broyé (avant réutilisation dans les travaux routiers, etc.).

Le temps passé pour démanteler le parc est estimé à 2 jours de travail sur chaque éolienne et 1 semaine par fondation — en cohérence avec l'avis de Thierry Ternois (déjà cité plus haut), directeur service Construction chez [Elys](#), pour qui 10 ETP, 2 grues et quelques engins de chantiers sont nécessaires et suffisants pour démanteler une éolienne en une semaine.

Autre retour d'expérience, celui d'Engie Green : en 2019, après plus de 25 ans d'exploitation, Engie Green a démonté et recyclé 3 des 5 machines composant le plus ancien parc éolien de France à Port-la-Nouvelle (Aude, Occitanie). Tous les éléments (mâts, nacelles, câblages, génératrices, huiles et pales) composants ces éoliennes ont été démontés, triés et acheminés vers des filières de recyclage et de valorisation spécialisées, avec un taux de recyclage des composants de 96 % (selon Engie Green). Après le démontage des pales, des nacelles et des mâts, ces composants sont stockés sur site. Les mâts en métal sont découpés sur place puis expédiés en aciérie pour recyclage. Les huiles sont traitées en vue d'une valorisation énergétique. Les pales sont découpées et (sommairement) compressées sur place, puis transportées vers une filière de recyclage (valorisation en fibres de verre). Sur la [vidéo](#) d'Engie Green, on voit que les opérations de découpage et de compression des pales sont réalisées à ciel ouvert, une simple bâche recouvrant le sol du chantier (cf. illustration ci-après). Les opérateurs portent des gants et des masques de protection (de type FFP2).





Chantier de démantèlement du parc éolien terrestre de Port-la-Nouvelle (source : [Engie Green](#), 2019).

La machine — Constrictor, un dispositif mobile et automatisé de compression des pales — apparaissant sur les vignettes et qui permet de compresser les pales sur site (diminuant les volumes à transporter) a été conçue par l'entreprise espagnole [Reciclalia](#) — procédé développé depuis plus de 10 ans et mis sur le marché en 2017.

Constrictor est mentionné dans ce [guide](#) (déjà cité plus haut) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec) publié en mai 2022, l'Ademe y faisant notamment un point sur la collecte et le tri des composites. Matériaux hétérogènes dans leur composition et leurs configurations, les composites ne disposent à ce jour pas d'une filière massive de collecte et de traitement. Deux filières se structurent actuellement dans ce sens, poussées par l'émergence de gisements de déchets composites conséquents : le nautisme et l'éolien. D'autres, comme l'automobile et l'aéronautique, pourraient se développer également, en s'appuyant sur leurs structures déjà en place pour les autres matériaux. Il n'existe aujourd'hui pas de filière structurée pour la valorisation matière des pales éoliennes, du fait d'un gisement encore confidentiel, et de pièces aux dimensions importantes, que des voies logistiques habituelles ne peuvent traiter. Cependant, la logistique de ce gisement de déchets est un des enjeux de la filière actuellement.

Une solution de collecte et de traitement des déchets éolien a vu le jour récemment, proposée par la start-up espagnole Reciclalia, en partenariat avec le groupe français Veolia-Suez. Cette innovation s'appuie sur deux technologies performantes : le procédé Constrictor (ci-avant), qui permet de découper et broyer la structure de la pale, suivie de la technologie CRS (Composite Recycled System), qui permet de revaloriser, une fois séparées, la résine et la fibre de verre (cf. illustrations ci-après). Le procédé Constrictor permet une découpe et une compression des pales sur le site même du démantèlement éolien, puis un transport vers le site de recyclage. Les coûts du transport et de stockage des pales à recycler en sont donc fortement diminués. Mais le coût de la collecte et du traitement sur site par ces méthodes reste inconnu à ce jour.



Le procédé Constrictor (source : [Environnement Magazine](#), n° 1793, janvier 2022).



La technologie CRS (Composite Recycling System), un procédé thermique pour séparer les résines des fibres (source : [Environnement Magazine](#), n° 1793, janvier 2022).



Opérations de démantèlement (découpe des mâts) conduite par l'entreprise allemande [ABO Wind](#) (source : [WindEurope](#), 2020).

Le [document](#) (déjà cité plus haut) de Green Energy 3000 relatif au projet éolien de Fère-Champenoise (Marne, Grand Est) évoque le trafic généré par le démontage et le transport des équipements d'un parc éolien à valoriser ou évacuer : grue de démontage et grues auxiliaires sont prévues sur site, pour démonter les éoliennes ; camions assurant le transport des matériaux vers les différents centres de traitement, ainsi que le conditionnement et la mise en décharge des parties non récupérables. Le document présente quelques ratios pour la phase démantèlement, fournis seulement à titre d'exemple, ces données étant variables selon les chantiers (cf. tableau ci-après).

Nombre de camions	Estimation
Grues de démontage	15 camions pour la grue principale seule 3 à 5 x 2 pour les grues auxiliaires
Excavation des chemins (si démantèlement)	0 à 6 camions et engins de travaux
Excavation des fondations (Base exemple : 1 m d'excavation)	15 à 20 camions par fondation
Nacelles	2 camions / nacelle
Mats	4 camions / éolienne (base : 4 sections de mâts)
Hubs	1 camion / hub
Poste de livraison	1 camion
Base de vie et installation chantier	5 camions
Excavation matériaux pistes	10 camions / jour
Excavation câbles	4 engins et véhicules

Estimation du trafic généré par le démantèlement des 4 éoliennes du parc (source : [Vestas](#), 2020).

Par ailleurs, cette [note](#) (déjà citée plus haut) relative au démantèlement du parc éolien (10 aérogénérateurs, puissance totale de 7,5 MW) de Sallèles-Limousis (Aude, Occitanie), se fondant sur des retours d'expérience provenant d'autres pays européens, ainsi que des premiers retours d'expérience d'EDF Énergies Nouvelles (aujourd'hui [EDF Renouvelables](#), maître d'ouvrage délégué) sur le démantèlement et la réhabilitation en 2010 du parc éolien de Sallèles-Limousis, avance un coût global des travaux de démantèlement des 10 éoliennes du parc d'environ 450 000 € — soit 45 000 € par éolienne.

En outre, ce [document](#) produit en juillet 2017 par l'entreprise allemande [Nordex](#) sur les modalités des garanties financières relatives au projet de parc éolien des Portes du Nivernais, situé sur les communes de Langeron et Saint-Pierre-le-Moûtier (Nièvre, Bourgogne-Franche-Comté) — à noter que ce projet de parc éolien ne verra jamais le jour suite à la décision du Conseil d'État rendue en août 2022, rejetant la contestation formulée par Nordex. Le projet visait à ériger quatre mâts, d'une puissance unitaire de trois mégawatts, avec une hauteur, en bout de pale, de 180 mètres. En se fondant sur ses retours d'expérience en Allemagne, Nordex présente une estimation du coût du démantèlement des modèles de machines N131-R99 et N131-R114 (selon Nordex, les coûts de démantèlement sont identiques pour les deux machines), en intégrant les bénéfices tirés de la revente des matériaux recyclés (cf. tableau ci-après). Le coût du démantèlement d'une N131-R114 est ainsi estimé à 41 468 €, celui du parc (4 éoliennes) à 165 872 €.

Poste	Mesures	Quantité	Prix unitaire	Prix total N131/3000 R114
Rotor et nacelle	Elimination fibre de verre	46 t	400,00 €	18 400 €
	Recyclage Acier	142,7 t	- 200,00 €	- 28 540 €
	Recyclage Cuivre	1,9 t	- 1 500,00 €	- 2 850 €
	Recyclage composant électrique	14 t	- 100,00 €	- 1 400 €
Tour	Recyclage Acier	295 t	- 200,00 €	- 59 000 €
	Recyclage Aluminium	0,5 t	- 700,00 €	- 350 €
Armoires, Transformateur	Recyclage composant électrique	13 t	- 100,00 €	- 1 300 €
Fondations	Démolition, Transport, Traitement du béton	675 m ³	50,00 €	33 750 €
	Recyclage Armature	100 t	- 100,00 €	- 10 000 €
Chemins et plateformes	Démantèlement	2 200 m ²	15,00 €	33 000 €
Câbles	Recyclage Cuivre	3,5 t	- 1 500,00 €	- 5 250 €
Frais Personnel	Démontage	4j	4 000,00 €	16 000 €
Coût Grue	Incl. Montage-Démontage	4j	12 000,00 €	48 000 €
Déchets Spéciaux	Elimination	2 800 kg	0,36 €	1 008 €
Coûts de démantèlement				41 468 €

Coût du démantèlement d'une N131-R114 (source : [Nordex](#), préfecture de la Nièvre, 2017).

Ce [document](#) daté du 22 juillet 2019 produit par la société [Éléments](#) en réponse aux questions sur le démantèlement, relatives au projet éolien de Saisy-Aubigny, situé sur les communes de Saisy (Saône-et-Loire, Bourgogne-Franche-Comté) et Aubigny-La-Ronce (Côte-d'Or, Bourgogne-Franche-Comté), évalue les coûts de démantèlement. Éléments se fonde sur une estimation du coût de démantèlement avancé par l'entreprise [Elys](#) pour 7 éoliennes de 200 mètres situées en forêt : 1 694 880 €, ce qui représente un coût par éolienne de 242 126 €. En plus des 50 000€ prévus par la réglementation, les filières de revente et de recyclage des matériaux des éoliennes permettront de financer l'ensemble du démantèlement.

À titre indicatif, les éoliennes de ce parc sont des machines Vestas V150-4.2 (puissance nominale de 4,20 MW) de 698 tonnes selon la répartition massique suivante :

- acier : 90 % ;
- matériaux composites : 3,9 % ;
- polymères : 3,6 % ;
- aluminium : 1,3 % ;
- électriques et électroniques : 0,5 % ;
- cuivre : 0,5 % ;
- huiles et lubrifiants : 0,3 %.

Ce type d'éolienne est ainsi composée notamment d'environ :

- 566 tonnes d'acier (55 tonnes pour le rotor, 390 tonnes pour le mât et 121 tonnes pour la nacelle) ;
- 3,1 tonnes de cuivre (0,9 tonnes pour le rotor, 1,2 tonnes pour le mât et 1 tonne pour la nacelle).

À la date de la rédaction de ce document, le prix à la tonne de l'acier est de 697 € et celui de la tonne de cuivre de 5 443 €. En prenant un prix de revente très fortement minimisé de 260 € la tonne d'acier et de 1 600 € la tonne de cuivre (données de l'entreprise allemande [Nordex](#) prenant en compte le transport des matériaux), le recyclage d'une éolienne permettrait de gagner 152 120 € — la revente d'autres matériaux comme l'aluminium n'est pas prise en compte.

Éolien offshore

Comment se fait le démantèlement d'un parc éolien posé et de son raccordement ? La [fiche thématique 12](#) (septembre 2021) du dossier du maître d'ouvrage (DMO) relatif au projet d'éolien offshore en Sud-Atlantique ([A07](#)) examine cette question sous différents angles : obligations réglementaires, garanties financières, techniques de démantèlement. Selon cette fiche, les techniques de démantèlement sont similaires d'un parc à l'autre, sauf en ce qui concerne les fondations. Les étapes habituelles d'un démantèlement sont ainsi les suivantes :

- mise hors service de l'installation électrique du parc éolien ;
- démontage de l'ensemble des composants des éoliennes, avec des moyens similaires à ceux utilisés pour leur installation ;
- retrait des protections si nécessaire et récupération des câbles électriques interéoliennes et des câbles de raccordement, avec des moyens similaires à ceux utilisés en phase de construction.

Deux possibilités sont envisageables pour le démantèlement des fondations :

- soit le développeur est contraint de retirer intégralement les fondations :
 - o c'est le cas du projet de parc éolien en mer de Fécamp (entrée en service en 2023), pour lequel les fondations sont gravitaires : il est prévu un démontage des fondations par désensablement, puis pompage du ballast et de l'eau de mer pour faire remonter les fondations à la surface ;
- soit le développeur peut laisser une partie des fondations en place :
 - o C'est le cas du projet de parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer (entrée en service en 2024), pour lequel les fondations sont de type monopieu : il est prévu d'enlever la partie des fondations partant des fonds marins jusqu'à la surface et de laisser la partie de la fondation enfouie dans le sol, pour éviter de creuser les fonds marins et, ainsi, limiter les impacts environnementaux qu'engendrerait le retrait total du pieu.

Des études à réaliser par le développeur et par RTE doivent préciser le périmètre et optimiser les modalités de démantèlement afin que l'ensemble de ces opérations, incluant la gestion de la sécurité en mer, soit réalisé dans les meilleures conditions environnementales, techniques et économiques. Les éléments du poste électrique en mer devront obligatoirement être démantelés mais, si l'étude réalisée par RTE démontre que les effets négatifs du démantèlement sont supérieurs à ceux du maintien (par exemple si déterrer les câbles en creusant les fonds marins risque d'impacter plus fortement l'environnement que de les y laisser), l'État peut autoriser RTE à déroger à l'obligation de démantèlement, et décider du maintien des câbles de raccordement.

La fiche 12 rapporte un retour d'expérience sur le démantèlement et le recyclage en 2016 de 5 éoliennes de 2 MW du parc éolien en mer d'Yttre Stengruden en Suède — premier démantèlement de parc éolien en mer au monde. La quasi-totalité des composants a été enlevée, y compris les câbles sous-marins. Seule subsiste une partie des fondations en béton, matériau inerte, coupées au niveau du fond marin. Le parc de Vindeby (Danemark), composé de 11 éoliennes de 0,45 MW chacune reposant sur des fondations gravitaires, a également été démantelé avec succès en 2017. La [fiche thématique 11](#) (septembre 2021) du dossier du maître d'ouvrage (DMO) relatif au même projet d'éolien offshore (A07), consacrée au cycle de vie d'une éolienne en mer posée, mentionne également un retour d'expérience sur le démantèlement et le recyclage d'éoliennes du [parc de Blyth](#) en Angleterre. Le développeur éolien E.ON a ainsi démantelé en mars 2019 deux éoliennes en mer posées de 2 MW, des opérations réalisées en 6 semaines, qui ont permis d'identifier les potentiels leviers (innovations) qui permettraient de faciliter et de réduire les coûts des futurs démantèlements. Une des turbines a été recyclée et réutilisée comme pièces de rechange, la seconde utilisée à des fins de formations. La fiche 11 aborde aussi — quoique de façon sommaire — la question du recyclage, rappelant que le développeur éolien est responsable du démantèlement et du recyclage

des éoliennes. Le démantèlement des composants des éoliennes s'effectue au port, les opérations (récupération des matériaux) s'en trouvant facilitées.

Même question s'agissant du démantèlement d'un parc éolien flottant. La [fiche thématique 17](#) (juillet 2021) du dossier du maître d'ouvrage (DMO) relatif aux projets d'éolien offshore flottant en Méditerranée ([A06](#)) examine cette question sous différents angles : obligations réglementaires, exigences environnementales, garanties financières, techniques de démantèlement et recyclage des composants.

Les techniques de démantèlement sont similaires d'un parc à l'autre, ces opérations étant facilitées par la technologie du flottant — absence d'éléments « fixes », sauf dans le cas où des pieux seraient installés. Les étapes d'un démantèlement sont les suivantes :

- mise hors service de l'installation électrique du parc éolien ;
- déconnexion du flotteur et de ses lignes d'ancrage ;
- remorquage des éoliennes à un port (avec des moyens similaires à ceux utilisés pour leur installation) en vue de leur démantèlement ;
- retrait des systèmes d'ancrage ;
- retrait des protections si nécessaire et récupération des câbles électriques interéoliennes et des câbles de raccordement, avec des moyens similaires à ceux utilisés en phase de construction ;
- démontage du poste électrique en mer.

Comme dans le cas de l'éolien en mer posé, des études à réaliser par le développeur et par RTE doivent permettre d'optimiser les modalités de démantèlement afin que l'ensemble de ces opérations, incluant la gestion de la sécurité en mer, soit réalisé dans les meilleures conditions environnementales, techniques et économiques. Si l'étude réalisée par RTE démontre que les effets négatifs du démantèlement sont supérieurs à ceux du maintien (par exemple si déterrer les câbles en creusant les fonds marins risque d'impacter plus fortement l'environnement que de les y laisser), l'État peut autoriser RTE à déroger à l'obligation de démantèlement, et décider du maintien des ouvrages (câbles) de raccordement.

La fiche 17 rappelle que, comme le prévoit le Code de l'environnement, tous les composants du parc éolien sont rapportés à terre et démantelés en éléments réutilisables, recyclables ou éliminables. Comme dans le cas de l'éolien en mer posé, le démantèlement des éoliennes en mer flottantes s'effectuant à terre (port), la récupération des matériaux (terres rares, autres matériaux critiques) contenus dans les turbines est facilitée, ce qui doit permettre d'aboutir à un recyclage quasi intégral. Les parties métalliques (mât, rotor) constituent plus de 90 % du poids des éoliennes et leur recyclage ne sera pas problématique (filiales terrestres existantes). Le principal défi à relever dans les années à venir étant le recyclage des pales en matériaux composites (10 % restants).

1.1.7 - Tri, transport et logistique post-démantèlement

Cette partie vise à préciser les techniques de tri et de séparation des flux, ainsi que les opérations de transport et logistique appliquées aux différents composants générés.

Ces aspects relatifs au divers matériaux (bétons, ferrailles, acier, cuivre, fonte, aluminium, DEEE, matériaux composites des pales et de la nacelle, DIB, huiles et graisses, déchets de chantiers divers, etc.) rencontrés sur les chantiers de démantèlement sont évoqués de manière transversale dans les différentes parties précédentes — notamment celle consacrée aux opérations de démantèlement des éoliennes (cf. supra).

Selon les dirigeants de Q Energy (déjà cités plus haut), le tri et la séparation des flux des matières sont réalisés sur place, dès l'amont, sur le site (parc éolien) où sont réalisées les opérations de démantèlement et immédiatement après celui-ci, selon des techniques habituellement utilisées par les entreprises du recyclage. Le transport et la logistique sont réalisés selon les méthodes et procédures applicables (déclaration en préfecture) au transport par la route de matières (déchets) non dangereux (absence de convoi exceptionnel).

1.1.8 - Technologies et procédés de recyclage et valorisation

Cette partie vise à décrire les procédés et technologies utilisés actuellement en recyclage et valorisation des différents composants d'éoliennes en fin de vie, en particulier :

- le recyclage mécanique voire chimique par broyage puis traitement des pales en polymère thermosensible, à la qualité et au devenir du recyclat obtenu ;
- la valorisation énergétique en tant que combustibles solides de récupération (CSR) ;
- les retours d'expériences (échelles pilote et industrielle).

Cette partie vise également à qualifier les technologies et procédés de recyclage et valorisation ainsi identifiés, en indiquant le niveau de développement (maturité technologique), les unités déployées (industrialisation) et retours d'expériences disponibles, les coûts d'équipement et de fonctionnement associés, ainsi que les impacts environnementaux et sanitaires des technologies et procédés employés.

L'essentiel de la masse totale d'une pale d'éolienne moderne est constitué de matériau composite à base de 60 à 70 % (en masse) de fibres de renfort et de 30 à 40 % d'une matrice polymère thermosensible — cf. supra, section Gisement des éoliennes en fin de vie, § Inventaire des matières à valoriser.

Un état des lieux des techniques de valorisation des composites a été présenté dans cette [étude](#) (citée plus haut) publiée en mai 2020 conjointement par le [Cefic](#), l'[EuCIA](#) et [WindEurope](#), relative au recyclage (méthode de recyclage — recycling) et de valorisation (recovery) des pales, et ce conformément à la hiérarchie des déchets. Aujourd'hui, la principale technologie de traitement des déchets composites des pales est la méthode dite de coprocessing (cotraitement) dans l'industrie cimentière (fours à ciment). Les matériaux composites peuvent également être traités par des procédés de broyage mécanique, thermiques (pyrolyse, lit fluidisé), thermo-chimiques (solvolyse) ou électromécaniques (fragmentation par champs électriques pulsés à haute tension) ou des combinaisons de ces procédés. Ces technologies et méthodes alternatives présentent différents niveaux de maturité technologique TRL (Technology Readiness Level) et ne sont pas toutes disponibles à l'échelle industrielle (cf. Étape 2 - Perspectives d'évolution). Les méthodes de traitement varient également dans leurs effets sur la qualité des fibres en sortie de procédé (longueur, résistance, propriétés mécaniques comme la rigidité, etc.), influençant ainsi la manière dont les fibres recyclées peuvent être réutilisées.

Le broyage mécanique fin (valorisation matière) est une technologie couramment utilisée en raison de son efficacité, de son faible coût et de sa faible consommation d'énergie. Cela diminue cependant drastiquement la valeur des matériaux recyclés. Les produits recyclés — fibres courtes et matrice broyée sous forme de poudre — peuvent être utilisés respectivement comme renfort ou charges. Du fait de la dégradation (irréversible) des propriétés mécaniques, le taux d'incorporation de charge est extrêmement limité dans les applications composites thermosensibles (moins de 10 %). Pour la réutilisation des fibres comme renforcement dans des applications thermoplastiques, la variation de composition et la contamination potentielle par des particules de résine ont un impact négatif sur la vitesse de fabrication de la résine thermoplastique renforcée et sur la qualité de la résine thermoplastique. Cela pourrait être minimisé si les processus de séparation et de démantèlement étaient améliorés et pourraient convenir dans les cas où plus aucune rétention de valeur (au sens de l'économie circulaire) n'est possible. Le broyage mécanique est considéré comme un procédé efficace, avec des débits élevés, bien que présentant une maturité technologique variable selon que les renforts sont en fibres de verre (TRL = 9) ou de carbone (TRL = 6-7).

Mais plusieurs inconvénients demeurent cependant, limitant son industrialisation. Ce procédé n'est pas encore économiquement compétitif par rapport à l'utilisation de matières premières vierges (le prix de la fibre de verre vierge est autour de 2 €/kg). La qualité des recyclats est médiocre en raison de la teneur élevée en d'autres matériaux. Une quantité importante de déchets de matériaux (jusqu'à 40 %) est générée lors du broyage, du tamisage et du traitement. Dernier point de vigilance : ce procédé nécessite des installations dédiées (zone confinée) pour limiter les émissions de poussières. Ce procédé reste le plus économique avec l'incinération dans les cimenteries.

Les auteurs du rapport du CGEDD/CGEJET de 2019 notaient, à propos de cette méthode par broyage, que plusieurs expériences concrètes avaient été citées au cours de leurs investigations (fabrication de barrières routières, de traverses de chemin de fer, de plaques de carrelage de terrasses, de mobiliers urbains tels que des jeux pour enfants ou encore des abribus, etc.) mais qu'aucun de ces usages n'avait trouvé un marché significatif au motif que, pour ces applications peu

exigeantes (les fibres sont très courtes, la granulométrie du broyat peu maîtrisée, etc.), le composite se trouve en concurrence avec des matériaux classiques (béton, bois, plastique non renforcé) moins chers. Le rapport du CGEDD/CGEIET cite notamment la société ABVal Composites à Puceul (Loire-Atlantique, Pays de la Loire), qui fabriquait des produits pour le bâtiment en composites recyclés, mais cette entreprise est [radiée](#) depuis 2021.

Dans la méthode de coprocessing (valorisation mixte matière et énergétique) mise en œuvre dans les cimenteries, la fibre de verre est recyclée en tant que composante du ciment (clinker : constituant du ciment obtenu par calcination d'un mélange de 80 % de calcaire — source de l'oxyde de calcium CaO — et de 20 % de silicates d'aluminium — source d'oxydes de silicium SiO₂, d'aluminium Al₂O₃ et de fer FeO/Fe₂O₃). La matrice polymère est brûlée comme combustible pour le procédé (CSR — combustible solide de récupération). Cette voie est considérée comme rapide, robuste et évolutive pour le traitement des déchets composites, pouvant bénéficier d'un schéma d'approvisionnement simple (les pales sont démontées sur place, facilitant le transport jusqu'à un centre de traitement). Ce procédé mature (TRL = 9) est jugé prometteur en termes de rentabilité et d'efficacité — de grandes quantités peuvent être traitées. En revanche, la forme physique des fibres du verre disparaissant lors du traitement, ce procédé ne peut pas être utilisé dans d'autres applications composites (les propriétés mécaniques des fibres de verre sont perdues). Pour l'heure, ce procédé est uniquement adapté aux composites renforcés par fibres de verre. Les gaz d'échappement doivent être traités. Ce procédé présente des limites, notamment en termes de volume (compétition avec d'autres filières utilisatrices de composites) et aussi du fait du risque d'obturation des filtres et des buses d'alimentation en gaz — selon le Syndicat allemand de l'énergie éolienne BWE (Bundesverband WindEnergie).

Les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET de 2019 notaient, à propos de la méthode par coprocessing, qu'une partie des fibres, entraînées dans les fumées, perturbe le fonctionnement des systèmes de filtration. Ils indiquaient également que la charge de silice n'apparaît pas comme un élément décisif d'acceptation du CSR par les cimentiers.

Dans cet [avis](#) relatif à l'énergie éolienne terrestre et en mer, paru en mars 2022, l'Ademe estime qu'une valorisation mixte (matière et énergie) des pales en cimenterie (valorisation énergétique et incorporation des résidus au clinker) devrait permettre d'absorber les flux sortants du parc éolien durant la phase transitoire où ces derniers ne sont pas encore suffisants (volumes, temporalité, synergies avec d'autres filières), préalablement à la structuration et l'industrialisation d'une filière de recyclage à proprement parler et selon un modèle économique adapté.

Ce [guide](#) (déjà cité plus haut) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec) publié par l'Ademe en mai 2022 présente les solutions techniques disponibles pour le traitement et le recyclage des matériaux composites, en particulier le recyclage mécanique (cf. [guide](#) Grec, pages 135-137) et la valorisation énergétique (combustible solide de récupération, pages 139-140 ; incinération, page 141). Le tableau ci-après présente une synthèse des principales technologies et solutions de revalorisation des matériaux composites.

Technologie	Avantages	Limites	Indication de coûts
Réemploi	- Utilisation de l'intégralité du matériau	- Coût de transport pour des pièces de grande envergure	Variable suivant application
Réutilisation	- Possibilité de valorisation de l'ensemble du matériau - Large spectre d'utilisation pour les produits non-consolidés	- Nécessité d'intégrer des étapes complémentaires de transformation du matériau ou de la matière - Solution souvent limitée à des applications de niche	Variable suivant application
Recyclage mécanique	- Faible coût de mise en œuvre - Recyclage intégral du matériau composite - Versatilité du procédé - Capacité à traiter de grande quantité de matériaux	- Détérioration des propriétés mécaniques des fibres - Valorisation limitée des produits - Forte compétition avec les charges naturelles (dans le cas des composites TD)	Inférieur à 4,5 €/Kg
Recyclage thermique	- Procédé compatible pour le traitement d'assemblage multi matériaux - Possibilité de réutilisation de l'ensemble des produits et sous-produits générés - Procédé avantageux pour le traitement des fibres de carbone (préservation de l'intégrité et des propriétés des fibres) - Possibilité de revaloriser les huiles de pyrolyse pour une valorisation énergétique ou une revalorisation matière - Coût énergétique du traitement inférieur à la fabrication de fibres vierges	- Coût de mise en œuvre - Production de gaz (CO et CO ₂) - Détérioration des propriétés des fibres de verre	De l'ordre de 11-17 €/Kg
Recyclage chimique	- Conservation des propriétés mécaniques d'usage et longueur des fibres traitées permettant leur revalorisation pour le carbone - Procédé avantageux pour le traitement des fibres de carbone (préservation de l'intégrité et des propriétés des fibres)	- Coût de mise en œuvre - Utilisation de solvant pouvant présenter des risques de toxicité et une gestion de fin de vie - Détérioration des propriétés de la fibre de verre	De l'ordre de 11-17 €/Kg
	- Possibilité de valoriser les produits et sous-produits générés - Coût énergétique du traitement inférieur à la fabrication de fibres vierges		
Valorisation énergétique	- Faible coût de mise en œuvre - Recyclage intégral du matériau composite - Valorisation possible de l'ensemble des produits générés (cendres et fibres)	- Production de gaz (CO et CO ₂) - Faible pouvoir calorifique inférieur des composites - Usure prématurée des broyeurs due au caractère abrasif des fibres de verre	0,16 €/Kg
Stockage	- Coût d'enfouissement faible	- Pollution de l'environnement - Interdiction progressive pour le stockage des matières plastiques - Hausse des coûts de stockage à prévoir (TGAP)	0,12-0,18 €/Kg (TGAP incluses)

Principales solutions techniques (source : [Ademe](#), 2022).

Le tableau suivant donne, de manière indicative, la consommation énergétique pour différentes technologies de revalorisation — un indicateur pertinent pour le coût environnemental et économique

de la technologie employée —, les coûts énergétiques ayant été largement étudiés sur les composites renforcés par des fibres de carbone (cf. illustration ci-après).

Fibre concernée	Procédé	Coût énergétique (MJ/kg)
Carbone	Fabrication	200 – 600
	Recyclage mécanique	0,3 – 2
	Pyrolyse	3 – 30
	Solvolyse	19,2
	Lit fluidisé	7,7
Verre	Fabrication	14 – 35

Coût énergétique pour l'obtention de fibres de carbone pour différentes techniques de recyclage ou de fabrication (source : [Ademe](#), 2022).

L'équilibre économique est basé sur les filières de gestion de la fin de vie des composites actuellement en place en France (enfouissement et valorisation en CSR).

L'enfouissement est soumis à la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP), dont la trajectoire d'augmentation prévoit une taxation à un taux unique de 65 € la tonne réceptionnée en stockage en 2025, contre 25 à 42 €/t en 2020. À cette hausse de la fiscalité doit également être intégrée la pression financière résultant de la hausse des tarifs de stockage induite dès 2019 par la diminution de l'offre face à la demande. Actuellement, le coût du stockage est de 120 et 180 €/t selon les régions, TGAP comprise, auxquels il faut ajouter les frais de transport des déchets. Les frais de transport pour les déchets sont estimés à 90 €/h de transport, selon les auteurs de l'étude, citant le magazine [Recyclage & Récupération](#) (octobre 2021).

S'agissant de la valorisation en CSR, l'association [Amorce](#) a identifié en 2021 36 installations de production de Combustible Solide de Récupération (CSR) à partir de déchets non dangereux, sur l'ensemble du territoire national, hors résidus de broyage automobiles. L'étude Amorce montre que 84 % des tonnages de CSR produits sont ainsi orientés vers les cimenteries, pour seulement 8 % en chaufferie et 2 % en four à chaux (les sites de CSR français sont présentés au chapitre 5 de l'étude Ademe — le chapitre 5 est un annuaire des acteurs du traitement des déchets composites). Un peu plus de la moitié de la matière est valorisée, soit sous forme de valorisation matière (15 %) soit sous forme de valorisation énergétique (37 %). Il est également présenté que 47 % de la matière est envoyée en refus. A 90 %, l'exutoire pour les refus de CSR est le stockage en installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Le coût total de préparation d'une tonne de CSR prend en compte l'ensemble des charges liées à l'unité, des investissements et des recettes. L'enquête Amorce indique que ce coût s'échelonne entre 39 € et 150 € HT la tonne, la moyenne étant située à environ 100 €/t. Il faut également noter que les unités de préparation de CSR payent une redevance auprès de l'exutoire de valorisation pour la reprise de leurs CSR, qui s'ajoute au coût de transport. La redevance est comprise entre 3 et 55 € la tonne pour une moyenne à 21 €/t. Les coûts de transport vers la filière cimentière et chaufferies varient quant à eux de 10 à 55 € HT/t pour une moyenne de 26 €/t. Sur la base des éléments collectés par l'étude Amorce, le coût moyen de traitement du CSR est de 165 €/t, calculé comme une moyenne pondérée des deux exutoires suivants :

- 150 €/t pour la matière valorisée énergétiquement ;
- 200 €/t pour les refus de tri.

Les recettes associées à la valorisation des matières, difficilement quantifiables, n'ont pas été prises en considération, ni les frais de gestion des déchets en amont de l'unité de production du CSR (frais de collecte et de transport), dans l'étude Amorce.

Si un détenteur de déchets composites souhaite valoriser un déchet en cimenterie, il devra s'adresser à un préparateur de CSR (liste de 36 préparateurs français au chapitre 5 de l'[étude](#) Ademe, établie sur la base de l'[étude](#) Amorce), qui a la charge de générer un combustible dont l'exutoire final est essentiellement une valorisation en cimenterie (liste de 29 cimenteries françaises au chapitre 5 de l'[étude](#) Ademe, établie en concertation avec le Syndicat français de l'industrie cimentière — [Sfic](#)).

Pour terminer sur le sujet de la valorisation énergétique, les auteurs de l'[étude](#) (déjà citée plus haut) du CGEDD/CGEIET de 2019 rappellent que la réglementation française distingue l'incinération avec valorisation énergétique des déchets non dangereux (déchets ménagers, déchets industriels banals) de celle des déchets dangereux. La valorisation énergétique des déchets non dangereux est réalisée dans les usines d'incinération des ordures ménagères, alors que la valorisation énergétique des déchets dangereux se fait dans des installations dédiées (avec récupération énergétique) ou des installations industrielles (principalement des cimenteries), ces deux types d'installation relevant de la rubrique 2770 de la nomenclature ICPE (2770 : « Traitement thermique de déchets dangereux ou contenant des substances dangereuses »).

En 2016 a par ailleurs été introduite la notion de combustible solide de récupération (CSR). Ainsi, selon l'article [R541-8-1](#) du Code de l'environnement, « un combustible solide de récupération est un déchet non dangereux solide, composé de déchets qui ont été triés de manière à en extraire la fraction valorisable sous forme de matière dans les conditions technico-économiques du moment, préparé pour être utilisé comme combustible dans une installation relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement ».

La rubrique [2971](#) de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) a été créée pour les installations de production de chaleur ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération dans une installation prévue à cet effet, associés ou non à un autre combustible. Les CSR, déchets non dangereux, doivent ainsi être préparés pour être valorisés dans une installation relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature ICPE.

Le composite issu d'une pale d'éolienne broyée a un pouvoir calorifique qui le rend éligible à la valorisation énergétique dans l'une des quatre types d'installations évoquées ci-dessus. Les déchets de pales (composites) peuvent être qualifiés de CSR (selon la définition) dès lors que ceux-ci correspondent au cahier des charges d'une installation relevant de la rubrique 2971.

Aujourd'hui (2023), ces déchets (non dangereux) ne peuvent être traités ni comme déchets industriels banals dans une usine d'incinération (cf. cadre réglementaire), ni comme déchets dangereux (techniquement possible mais économiquement prohibitif). Il reste donc la possibilité de valoriser ces déchets comme CSR, soit dans une unité relevant de la rubrique 2971, soit dans les cimenteries.

1.1.9 - Viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes

Cette partie vise à estimer les volumétries des marchés de revente et les prix de reprise des matériaux recyclés (granulats béton, ferreux et non-ferreux type cuivre, fibres verre et carbone, terres rares, CSR, etc.) et, sur la base de retours d'expérience d'opérations de démantèlement et de recyclage d'éoliennes, établir la rentabilité opérationnelle que cette activité est susceptible de générer.

Selon l'[étude](#) (déjà citée plus haut) du CGEDD/CGEIET de mai 2019, la rentabilité opérationnelle que peut générer l'activité du recyclage dépend de l'écart entre le coût des opérations de démantèlement et de recyclage d'une part et, d'autre part, le produit que peut en retirer le recycleur, à savoir :

- coût des opérations :
 - o Cd = coût (équipement, main d'œuvre, prétraitement sur place) du chantier de démantèlement,
 - o Cé = coût d'élimination des matériaux à prix négatifs (composites, béton) ;
- produits :
 - o F = montant facturé à l'exploitant du parc,

- Vp = vente de pièces détachées,
- Vf = vente des métaux ferreux,
- Vnf = vente des métaux non ferreux.

Pour une éolienne de 3 MW, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET prennent les hypothèses suivantes :

- Cd :
 - selon la complexité du chantier et les conditions, en particulier météorologiques, influant sur la durée d'immobilisation des grues pour intervention en hauteur, la valeur de Cd peut varier de 60 k€ à 170 k€ (productivité des entreprises...),
 - la valeur moyenne retenue Cd = 110 k€ ;
- Cé :
 - 1 000 t de béton, coût d'élimination 7,5 €/t,
 - 33 t de composites, coût d'élimination 150 €/t (hypothèses sur les coûts d'élimination des matériaux non recyclables),
 - la valeur totale retenue Cé = 7 500 + 4 950 = 12,5 k€ (action publique possible sur cette variable) ;
- F :
 - la base de calcul est la valeur du cautionnement (garantie financière¹⁴),
 - la valeur retenue F = 50 k€ (action publique possible sur cette variable) ;
- Vp : valeur provisoirement fixée à zéro (absence de marché de la seconde main) ;
- Vf :
 - 420 t de fonte et ferraille à 100 €/t (prix mondiaux du marché des métaux),
 - Vf = 42 k€ ;
- Vnf :
 - 9 t de cuivre à 4 000€/t (volatilité du prix du cuivre) et 6 t d'aluminium à 500 €/t,
 - Vnf = 39 k€ (prix mondiaux du marché des métaux).

En définitive, la marge opérationnelle se situe autour de 9 k€, soit un peu plus de 7 % des coûts supportés.

En outre, selon Jean-Yves Grandidier, cofondateur de France énergie éolienne (FEE), lors de son [audition](#) du 7 mai 2019 devant l'Assemblée nationale, « le démantèlement d'un parc éolien coûte 50 000 à 75 000 euros par MW, soit 3 % à 5 % du coût de construction ». Pour les machines récentes de 4 MW, cela représenterait un montant compris entre 200 000 et 300 000 €.

Par ailleurs, dans cet [article](#) (déjà cité plus haut) de 2020, à propos de la revente de l'acier, les auteurs Védrine et Jourdain citent l'exemple d'une éolienne de 126 m de diamètre de rotor et une hauteur au moyeu de 117 m, pour laquelle la masse des sections d'acier de la tour représentent autour de 270 tonnes. En considérant un coût d'achat de l'acier à 140 €/tonne, cela représenterait une revalorisation financière de presque 38 000 € uniquement pour l'acier de la tour d'une éolienne, selon l'entreprise [Volkswind](#) — sans compter les câbles en aluminium ou en cuivre de la tour ou du réseau inter-éolien et du poste de livraison, ainsi que tous les autres éléments valorisables et réutilisables (cf. réf. [10] de l'article de Védrine et Jourdain).

Enfin, selon Grégoire Verhaeghe, fondateur d'[Innovent](#), cité dans cet [article](#) paru le 21 février 2022 dans Les Échos Planète, « rien qu'avec l'acier, il est possible de récupérer environ 70 000 euros lors du démantèlement d'une éolienne. Si on ajoute à cela le cuivre et le béton, cela suffit largement à couvrir les frais ». En revanche, pour ce dirigeant, les 1 000 tonnes de béton dans le sol restent un problème, le retrait complet de la dalle pouvant s'avérer difficile.

¹⁴ En vertu de l'[arrêté](#) (déjà cité plus haut) modifié du 26 août 2011, le montant de la garantie financière pour une éolienne a été revu (à la hausse) depuis le 1^{er} janvier 2022 : il est de 50 000 € pour une éolienne d'au plus 2 MW, auquel il faut ajouter 25 000 € par MW supplémentaire — pour une éolienne de 3 MW, le montant de la garantie financière sera ainsi de 75 000 €.

1.2 - Situation en Europe et dans le monde

Dans cette partie, il s'agit d'apporter des éléments de comparaison de la filière française de fin de vie des éoliennes, telle que caractérisée ci-avant, par rapport à des filières emblématiques à l'étranger.

En premier lieu, sont identifiés en Europe et dans le monde des pays remarquables au regard d'organisations structurantes ou de pratiques exemplaires en matière de fin de vie des éoliennes (démantèlement, réemploi, réutilisation, recyclage, valorisation).

En second lieu, les filières ainsi identifiées sont caractérisées en suivant la grille d'analyse utilisée ci-avant dans la 1^{re} partie de l'étape 1. L'objectif est bien d'éclairer les différents aspects abordés dans le cas de la filière française de fin de vie des éoliennes par les enseignements tirés de la vision européenne et mondiale. Les divers éléments sont également regroupés par Section qu'accompagne un paragraphe introductif.

1.2.1 - Choix des pays cibles

Cette partie vise à produire, à l'issue des recherches menées pour identifier des pays remarquables, un argumentaire permettant de comprendre la composition du référentiel des pays réputés particulièrement actifs sur la filière de fin de vie des éoliennes, à la base de l'analyse ultérieure.

En premier lieu, il convient de remarquer que les pays particulièrement dynamiques en matière de fin de vie des éoliennes sont nécessairement des pays qui disposent (ou vont disposer) de gisements importants de machines à démanteler, c'est-à-dire des pays actifs en matière d'installation de parcs éoliens.

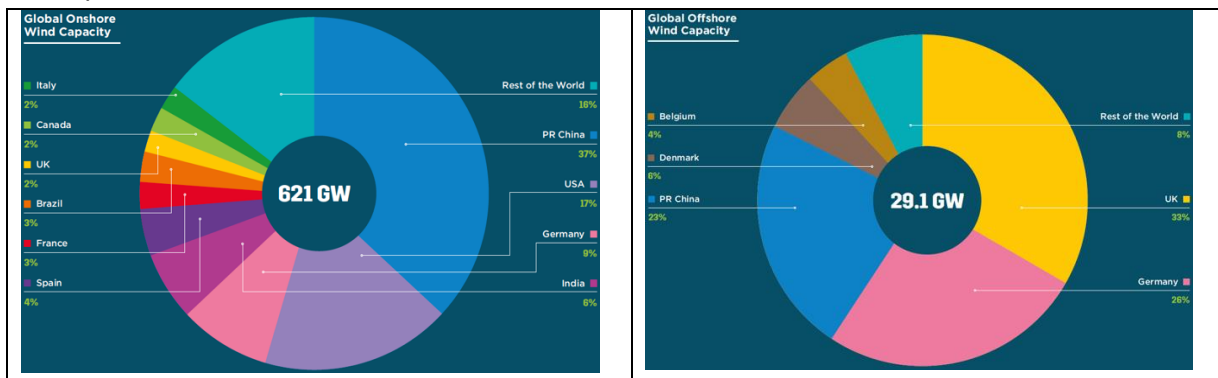
En 2020, à l'échelle mondiale, l'Allemagne est le pays qui démantèle le plus d'éoliennes en fin de vie, comme l'indique la figure ci-après où les volumes démantelés sont appréciés en nombres de machines (units) et/ou en capacités (MW). Et globalement, c'est bien en Europe que sont démantelées la majorité (près de 75 %) des d'éoliennes en fin de vie dans le monde.

Country	Decommissioned units 2020	Decommissioned MW 2020	Rang
 US	n/a	74.3	2
 Germany	203	222	1
 Austria	n/a	64	3
 UK	n/a	0.25	10
 Denmark	32	26.1	5
 Belgium	n/a	25	6
 France	n/a	14.5	7
 Luxembourg	n/a	2	9
 Japan	38	35	4
 South Korea	n/a	8.7	8
Total	>300	471.9	

Démantèlement des éoliennes en 2020 dans le monde (source : Global Wind Energy Council, [GWEC](#), [GWEC Market Intelligence](#), novembre 2021).

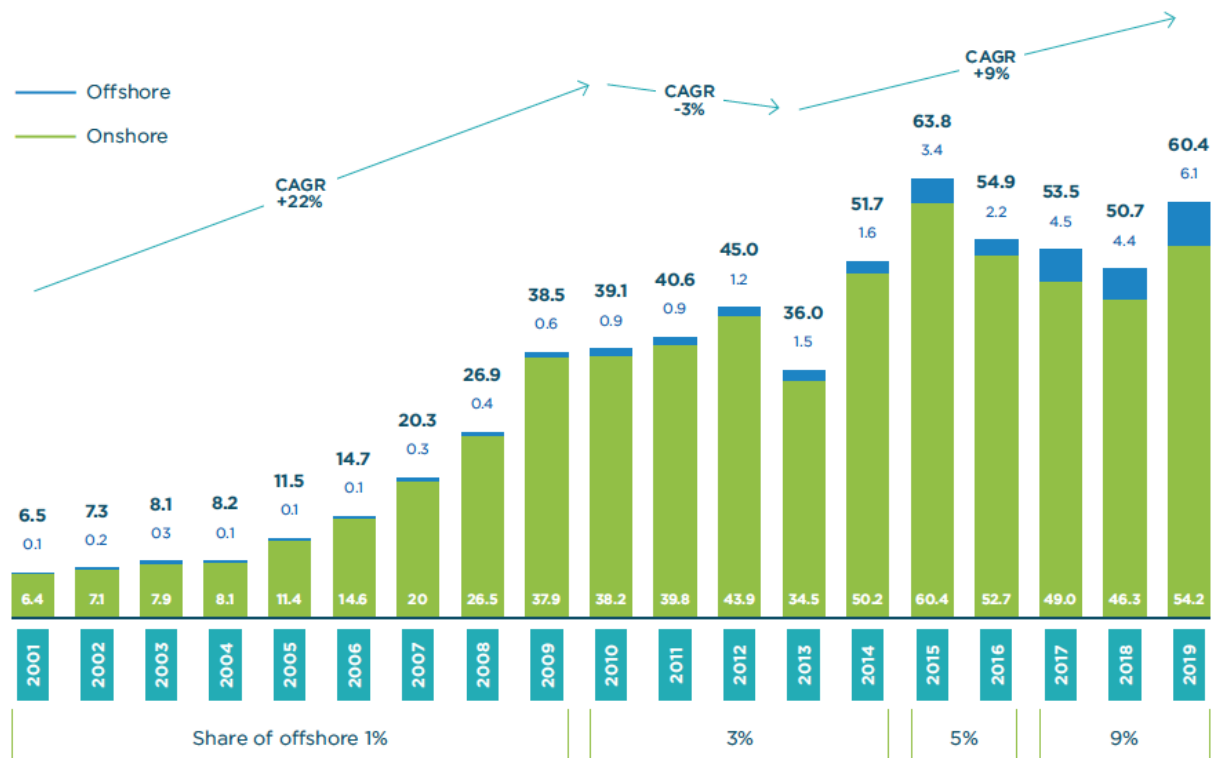
A l'échelle mondiale, selon cette [étude](#) du cabinet Transparency Market Research, l'Europe devrait être un marché clé pour le démantèlement des éoliennes, de 2020 à 2030 — ces dernières années, la plupart des éoliennes démantelées provenaient d'Allemagne.

Toujours à l'échelle mondiale, ce [rapport](#) de phase 1, publié en mars 2021, du projet relatif au démantèlement durable et au recyclage des pales d'éoliennes mené par l'Energy Transition Alliance — entité formée par l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#), centre d'innovation technologique et de recherche mis en place par Innovate UK) et l'Oil & Gas Technology Centre (OGCT, aujourd'hui le [Net Zero Technology Centre](#)) — montre la répartition à date des capacités éoliennes dans le monde, tant dans les parcs terrestres que dans les installations offshore (cf. illustration ci-après). S'agissant des capacités terrestres, la Chine prédomine, suivie par l'Europe. Mais pour l'éolien en mer, c'est l'inverse, l'Europe arrive largement en tête, avec près des trois-quarts des capacités installées.



Les capacités éoliennes à l'échelle mondiale (source : [ORE Catapult](#), 2021).

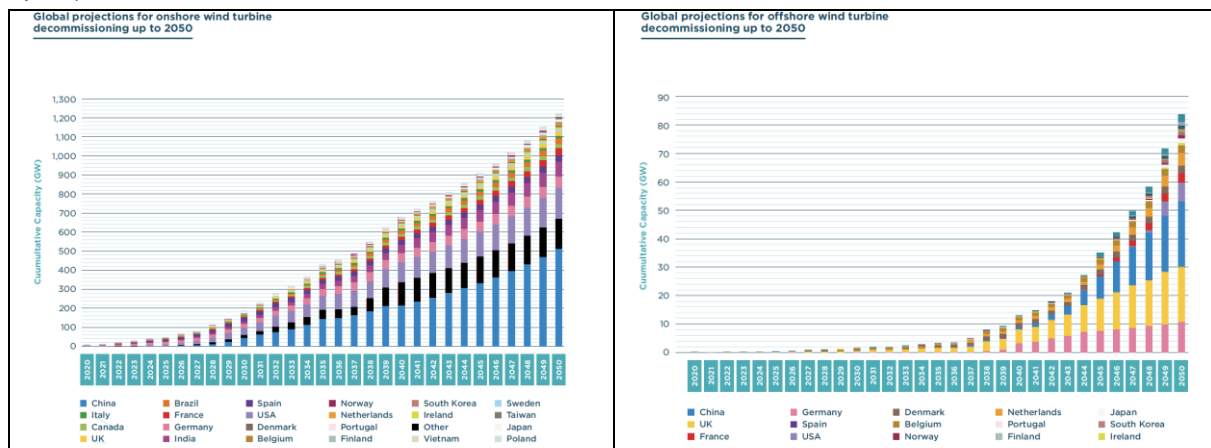
Et partout dans le monde, les installations éoliennes vont croissant comme l'indique l'illustration ci-après, montrant le taux de croissance annuel moyen CAGR (Compound Annual Growth Rate), exprimé en GW installés annuellement dans le monde.



Taux d'installation de capacités éoliennes dans le monde — la part de l'éolien offshore dépasse aujourd'hui 10 % de la puissance totale installée (source : [ORE Catapult](#), 2021).

Une autre dimension à prendre en compte — toujours à l'échelle mondiale — est l'âge des parcs éoliens. Les parcs les plus anciens (donc les plus proches de leur fin de vie) sont à rechercher en Europe — notamment au Danemark, en Allemagne, en Espagne, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni ou encore en Italie (cf. [WindEurope](#)). Mais les projections mondiales en matière de démantèlement des éoliennes (volumes démantelés onshore et offshore, exprimés en GW) jusqu'en 2050 montrent une

part grandissante d'autres pays, comme la Chine ou les États-Unis en particulier (cf. illustration ci-après).



Projections mondiales pour le démantèlement des éoliennes (source : [ORE Catapult](#), 2021).

Concernant des données prospectives sur les déchets de pales d'éoliennes en 2050, voir cette [publication](#) (accès payante) de 2017 (version gratuite [ici](#)).

Enfin, une dimension importante à prendre en considération concerne les pratiques adoptées par les différents pays.

Selon cet [article](#) du South China Morning Post daté du 7 août 2022, en Chine, bien que figurant sur la feuille de route du gouvernement, le développement d'un écosystème de recyclage des équipements éoliens (et solaires également) en fin de vie n'en est à ce jour qu'à ses balbutiements. La Chine n'apparaît donc pas comme un pays à conserver pour l'analyse conduite dans cette 2^e partie de l'étape 1 mais sera retenue en revanche au titre de l'étape 2.

Même remarque s'agissant des États-Unis. Une revue de presse et d'Internet réalisée sur les derniers mois fait apparaître que l'enfouissement des pales en fin de vie est jusqu'à récemment l'option la plus couramment adoptée. Voir par exemple cet [article](#) du quotidien Des Moines Register (Des Moines, capitale de l'Iowa) du 7 novembre 2019, qui illustre abondamment les opérations de démantèlement. Situation à l'identique dans le Minnesota — état leader dans le déploiement d'éoliennes aux États-Unis — car les coûts de logistique et d'expédition sont prohibitifs, le recyclage coûtant trois à huit fois plus que la mise en décharge, comme l'indique cet [article](#) dans Star Tribune — le plus grand quotidien du Minnesota — le 10 décembre 2022. Selon Aubryn Cooperman, scientifique au National Renewable Energy Laboratory (NREL), citée dans cet [article](#) du magazine hebdomadaire Chemical & Engineering News du 8 août 2022, contrairement à l'Europe où les coûts d'élimination sont élevés et l'espace dans les décharges limité, la mise en décharge reste une option aux États-Unis (coût limité, espace disponible). Voir enfin cet [article](#) publié le 8 juillet 2021 par le Kleinman Center for Energy Policy (université de Pennsylvanie), aux États-Unis, selon lequel les pales d'éoliennes en fin de vie sont principalement envoyées dans quelques-unes des décharges qui les acceptent dans l'Iowa, le Dakota du Sud ou encore le Wyoming, et ce à un rythme annuel de près de 8 000 pales actuellement — à consulter également cet [article](#) de Bloomberg du 5 février 2020, montrant les cimetières de pales aux États-Unis. Comme pour la Chine, les États-Unis seront examinés au titre de l'étape 2. À noter que dans cette [fiche](#) de septembre 2020, l'American Clean Power Association (ACP), formule des recommandations sommaires (absence d'éléments chiffrés) en matière de démantèlement de parcs éoliens (plan de démantèlement, exigences diverses, coûts, garanties financières, calendrier de mise en œuvre). Restant en Amérique du Nord, au Canada, cette [fiche](#) d'avril 2021 de la Canadian Renewable Energy Association (CanREA) indique qu'il y a pour l'heure très peu de parcs éoliens démantelés ou renouvelés au Canada et il est attendu que la plupart des plus anciens parcs restent opérationnels jusqu'à dans les années 2030.

En Europe, la situation est radicalement différente et, pour mémoire, l'association WindEurope a lancé à la mi-juin 2021 un [appel](#) aux dirigeants des pays de l'Union européenne pour interdire, d'ici à 2025, l'enfouissement des pales d'éoliennes. Cette interdiction est déjà en place en Allemagne, en Autriche, en Finlande, ainsi qu'aux Pays-Bas. Pour les raisons qui ont été évoquées ci-avant, cette 2^e partie de l'étape 1 sera axée sur l'examen de la situation en Europe, en particulier les pays (Allemagne, Danemark, Espagne, Italie, Royaume-Uni, Pays-Bas) inclus dans le périmètre de l'[étude](#) de WindEurope (novembre 2020, déjà citée plus haut) sur le démantèlement des éoliennes terrestres, ainsi que dans celui de cette [étude](#) (déjà citée plus haut) publiée en mai 2020 conjointement par le

Cefic, l'EuCIA et WindEurope. À toutes fins utiles, Autriche, Belgique et Finlande seront également examinés.

1.2.2 - Devenir des éoliennes en fin de vie

Cette partie vise à produire des chiffres de répartition massique entre réemploi, recyclage et élimination des différents composants et matériaux issus du démantèlement des éoliennes en fin de vie.

Selon la Task Force for Dismantling and Decommissioning lancée à l'initiative de [WindEurope](#) en juillet 2020 dans le but d'harmoniser les normes nationales qui s'appliquent à la mise hors service et au démantèlement des éoliennes, il y a en Europe près de 34 000 éoliennes terrestres âgées de 15 ans ou plus, représentant une capacité d'environ 36 GW. Près du quart (9 GW) de cette puissance correspond à des machines ayant entre 20 et 24 ans et environ 1 GW correspond à des éoliennes de 25 ans ou plus. Cela crée un grand marché pour le démantèlement des parcs éoliens terrestres au cours de la décennie.

Comme suite à la création de cette Task Force, WindEurope organise depuis novembre 2020 un séminaire sur les enjeux et stratégies de fin de vie des éoliennes EoLIS (End-of-Life Issues and Strategies). Trois sessions de ce séminaire se sont tenues depuis lors, tel qu'indiqué ci-après :

- EoLIS 2020 (webinaire, 18-20 novembre 2020) : <https://windeurope.org/eolis2020/> :
 - o les actes (proceedings) de ce webinaire ne sont pas accessibles publiquement ;
- EoLIS 2021 (Bruxelles, 4-5 novembre 2021) : <https://windeurope.org/eolis2021/> :
 - o absence d'actes ;
- EoLIS 2022 (Gand, 1^{er}-2 décembre 2022) : <https://windeurope.org/eolis2022/> :
 - o les actes de ce séminaire ne sont pas accessibles publiquement ;
- EoLIS 2023 (Rotterdam, 22-23 novembre 2023) : <https://windeurope.org/eolis2023/> :
 - o les actes de ce séminaire ne sont pas accessibles publiquement.

Un chiffre communément admis est que plus de 90 % (parfois beaucoup plus, valeur approchant les 100 %, selon les sources) de la masse d'une éolienne peut aujourd'hui être recyclée. Mais une revue de presse et d'Internet, réalisée sur les dernières années (2020 à 2023) à l'échelle de l'Europe, n'a pas permis d'identifier de données agrégées relatives à la répartition massique entre réemploi, réutilisation, recyclage et valorisation ou élimination des composants et matériaux provenant du démantèlement des éoliennes en fin de vie.

Pour ce qui concerne la France, une partie de ce [guide](#) (déjà cité plus haut, cf. 1^{re} partie de l'étape 1) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec), publié en mai 2022 par l'Ademe, est consacrée aux méthodes et solutions techniques (technologies disponibles sur le marché) applicables au traitement et au recyclage des matériaux composites issus des éoliennes en respectant la hiérarchie de gestion des déchets :

- le réemploi ;
- la réutilisation ;
- le recyclage (recyclage mécanique, recyclage chimique par pyrolyse, recyclage chimique par solvolysé) ;
- la valorisation énergétique (combustible solide de récupération, incinération) ;
- le stockage (élimination en décharge).

Mais ce guide ne présente pas de données chiffrées sur la répartition massique entre ces différentes voies, et ce ni pour la France (périmètre géographique du guide Grec), ni pour l'étranger (les auteurs ont consulté des acteurs situés en dehors du territoire national — pays européens et non européens). Le guide Grec indique toutefois qu'en matière de réemploi, aux Pays Bas, près de 20 % des pales sont remises à neuf et revendues à des acheteurs à l'intérieur et à l'extérieur de l'Union européenne par des revendeurs tels que le danois [Green-Ener-Tech](#) ou la plateforme [WindTurbines-MarketPlace.com](#) opérée par [wind-turbine.com](#). La plateforme [wind-turbine.com](#) est une place de marché en ligne de l'industrie éolienne (neuf et occasion), d'origine allemande et principalement européenne mais d'ambition internationale — [site](#) en français. Dans cette [présentation](#) faite lors d'une

[conférence](#) sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie en France et en Allemagne, organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)) le 12 mars 2020 à Berlin (dispositifs réglementaires en vigueur, retours d'expérience, aspects économiques, conception, etc. — voir le [programme](#) de cette conférence), Bernd Weidmann, directeur général de la plateforme wind-turbine.com, présente cette place de marché globale qui adresse le marché de seconde main.

En matière de réemploi, ce [rapport](#) d'étude de l'Ademe publié en juillet 2020 (voir supra, dans la 1^{re} partie de l'étape 1, section Devenir des éoliennes en fin de vie), relatif aux stratégies envisageables en matière de renouvellement (repowering) des parcs éoliens terrestres en fin d'exploitation, indique que le marché européen d'éoliennes de seconde main, de reconditionnement et de vente de pièces détachées est bien établi, citant plusieurs acteurs européens :

- [Deutsche Windtechnik](#) (expert en Allemagne pour le [repowering](#), les opérations de démantèlement d'éoliennes, le commerce d'éoliennes d'occasion et de [pièces de rechange](#)) ;
- [Connected Wind Services](#) (au Danemark, cette entreprise propose un ensemble de services éoliens, notamment un service de [pièces détachées et composants](#) d'éoliennes, et revendique le plus vaste stock de composants et de pièces détachées de marques diverses, avec plus de 5 000 pièces et composants en stock) ;
- [G2WIND](#) (Espagne) ;
- [Repowering solutions](#) (en Espagne, qui commercialise exclusivement des pièces d'occasion), [Mywindparts](#) (France) ;
- [Spares In Motion](#)* (au Pays-Bas, plateforme e-business pour les pièces détachées d'éoliennes neuves et d'occasion) ;
- [Renewable Parts](#) (Royaume-Uni).

* À propos de Spares In Motion, voir la [présentation](#) de Jochem Sauer, directeur général de cette entreprise, faite lors d'un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire), organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), le 21 mai 2019 à Paris.

En matière de réutilisation, la ville portuaire d'Aalborg — troisième plus grande aire urbaine, après Copenhague et Aarhus —, au Danemark, a trouvé une nouvelle utilisation innovante pour les anciennes pales d'éolienne, en les transformant en abris à vélos pour les cyclistes de la ville — premier exemplaire installé en 2020. À titre indicatif, près de 9 Danois sur 10 possèdent un vélo, ce moyen de transport représentant un quart de tous les trajets de moins de 5 km dans ce pays. Pour mémoire, c'est à Aalborg que Siemens Gamesa fabrique sa [RecyclableBlade](#) (cf. Étape 2).



Sections de pales transformées en abri pour vélos (source : [Siemens Gamesa](#), 2021). D'autres photos sont disponibles [ici](#).

Les réalisations faites à Aalborg (abris pour vélos) ont été effectuées dans le cadre du projet [Re-Wind](#), une initiative qui explore les modalités de réutilisations potentielles des pales en composites dans des structures architecturales et techniques, en proposant notamment leur réutilisation comme abris pour vélos ou passerelles piétonnes. L'objectif du projet Re-Wind est de comparer, sous l'angle de la durabilité, des stratégies de réutilisation et de recyclage d'éoliennes en fin de vie à l'aide de la modélisation structurelle de données dans une plate-forme GIS (Geographic Information Science) couplée à des analyses de type LCSA (Life–Cycle Sustainability Assessments). Les membres du réseau de Re-Wind sont issus du Georgia Tech (Georgia Institute of Technology, Atlanta, États-Unis), de l'University College Cork (Royaume-Uni), de la Queen's University Belfast (Royaume-Uni), de la City University New York (États-Unis) et de la Munster Technological University (campus de Cork, Royaume-Uni). À Cork (Irlande), Re-Wind envisage la réutilisation de pales en skateparks, gradins de stades ou barrières antibruit. L'équipe de Re-Wind planche également sur la réutilisation de pales en applications très diverses telles que poteaux électriques, antennes de téléphonie mobile, mâts de lampadaires, enseignes, barrières antibruit, abribus, modules de glamping, usages agricoles, mobiliers de jardin et urbains, éléments d'architecture ou de construction, logements d'urgence ou bon marché, etc. ([catalogue](#) Re-Wind 2022).

Toujours en matière de réutilisation sous forme de mobilier urbain, à noter [Wikado](#) (cf. illustration ci-après et voir aussi cette [source](#)), une aire de jeu pour enfants située dans une école primaire à Rotterdam (Hollande-Méridionale, Pays-Bas), dont les équipements (tunnels, tours, toboggans et autres éléments) proviennent de cinq anciennes pales d'éoliennes découpées, réassemblées et soudées.



Dans le même esprit, au Royaume-Uni, à noter l'entreprise [ReBlade](#), une startup écossaise qui a développé — bénéficiant d'un financement de l'agence nationale d'innovation britannique Innovate UK — le premier service du Royaume-Uni spécialisé en matière de démantèlement et réutilisation (infrastructures publiques, etc.) des pales et nacelles d'éoliennes. ReBlade a ainsi obtenu une subvention de 50 000 £ (env. 57 000 €) pour un projet de six mois (jusqu'en avril 2023) intitulé « Certifying Wind Turbine Blade Derived Products », visant à développer un cadre d'essai des matériaux et un régime de certification de sécurité pour les pales d'éoliennes déclassées et réutilisées.

Les auteurs de cette [étude](#) (déjà citée plus haut) publiée en mai 2020 conjointement par le Cefic, l'EuCIA et WindEurope, qui mentionne plusieurs exemples de réutilisation, notaient toutefois que les cas de réaffectation connus représentent surtout des projets de démonstration et ne constitueront probablement pas une solution à grande échelle pour les futurs volumes de pales attendus.

Il apparaît que les informations quantitatives sont à rechercher pays par pays, ce qui a été fait systématiquement en sollicitant les organisations suivantes en Europe (classement alphabétique des pays) :

- Allemagne*† :
 - o Bundesverband WindEnergie e.V. ([BWE](#) — association fédérale de l'éolien) :
 - statut : absence de retour,
 - o Deutsche Energie-Agentur GmbH ([dena](#) — agence nationale de l'énergie) :
 - statut : absence de retour,
 - o [Deutsche WindGuard](#) GmbH (consultant en ingénierie) :
 - statut : absence de retour,
 - à noter que ce bureau d'études a publié le 7 février 2023 ce [bilan](#) 2022 de l'éolien terrestre et maritime sur le territoire allemand,
 - o Fachagentur Windenergie an Land e.V. ([FA Wind](#) — agence allemande spécialisée dans l'éolien terrestre) :
 - statut : absence de retour,
 - o Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen e. V. ([RDRWind](#) — association professionnelle pour le repowering, le démantèlement et le recyclage des éoliennes) :
 - statut : retour sur la norme DIN SPEC 4866 (voir infra),
 - o Umweltbundesamt ([UBA](#) — agence fédérale de l'environnement) :
 - renvoie vers l'étude UBA 2022 (cf. Étape 2, 1^{re} partie),
 - à consulter : cette [présentation](#) de Petra Weißhaupt (UBA), faite lors d'un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire), organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), le 21 mai 2019 à Paris (résultats de l'étude UBA d'octobre 2019 citée plus loin),
 - o Windenergie-Agentur Bremerhaven/Bremen e.V. ([WAB](#) — agence de l'énergie éolienne de Bremerhaven et Brême) :
 - statut : absence de retour ;
- Autriche* :
 - o Interessengemeinschaft Windkraft Österreich ([IG Windkraft](#) — groupe d'intérêt autrichien pour l'énergie éolienne) :
 - statut : absence de retour ;
- Belgique :
 - o Fédération des énergies renouvelable ([EDORA](#)) :
 - statut : absence de retour,
 - o Vlaamse Windenergie Associatie ([VWEA](#) — association flamande de l'énergie éolienne) :
 - selon VWEA (réponse conjointe avec l'entreprise néerlandaise [Business in Wind](#) — Business in Wind achète, démantèle, vend, reconditionne, stocke, transporte et installe des éoliennes d'occasion et des pièces détachées dans le monde entier), nombre d'éoliennes sont mises hors service prématurément et peuvent être reconditionnées en vue d'une seconde vie, de sorte que jusqu'à présent, environ 85 % des machines démantelées sont réemployées, les 15 % restantes étant recyclées (ou les composants reconditionnés) à un taux de 95 % (soit 5 % de rebuts — câbles, boîtiers de nacelles, etc. et non les pales qui, elles, sont diversement réutilisées via le partenaire [Blade Made](#) ou recyclées par exemple en carreaux ou éléments de béton) ; mais cette tendance devrait complètement s'inverser dans les trois prochaines années où seules 15 % des éoliennes mises hors service seront réemployées et les 85 % restantes seront recyclées — une évolution confirmée par la lecture de cet [article](#) de Renouvelle.be du 24 juin 2020, consacré au premier repowering de parc éolien en Wallonie en 2020, qui indique que les machines et matériaux ont fait l'objet d'un recyclage quasi complet, car la revente à l'étranger des machines d'occasion est difficile, le marché de la seconde main

- étant saturé de machines en provenance d'Allemagne qui concrétise de nombreux projets de repowering sur son territoire,
- et selon cet autre [article](#) de Renouvel.be du 8 décembre 2020, la Wallonie a adopté un cadre réglementaire pour le démontage des éoliennes en fin de vie, prévoyant la remise en état du terrain (les conditions sectorielles en Wallonie), les composants éoliens et les fondations sont gérés suivant les législations relatives aux déchets (le décret déchet en Wallonie),
 - VWEA indique que sous l'angle réglementaire (voir infra, section Réglementation relative à la fin de vie des éoliennes), une fois les éoliennes entrant dans la voie du recyclage, tous les composants acquièrent le statut de déchets et sont traités comme tels, rend la circularité plus difficile ;
- Danemark† :
 - [Energistyrelsen](#) (agence danoise de l'énergie) :
 - statut : absence de retour,
 - [Green Power Denmark](#) (résulte de la [fusion](#) entre Wind Denmark, Dansk Energi et Dansk Solkraft) :
 - statut : absence de retour,
 - [Miljøstyrelsen](#) (Agence de protection de l'environnement) :
 - statut : absence de retour ;
 - Espagne† :
 - Asociación Empresarial Eólica ([AEE](#) — association des entreprises de l'éolien) :
 - statut : absence de retour,
 - Asociación de Empresas de Energías Renovables ([APPA](#) — association des entreprises des énergies renouvelables) :
 - statut : absence de retour,
 - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía ([IDAE](#) — institut pour la diversification et les économies d'énergie) :
 - statut : absence de retour ;
 - Finlande* :
 - [Suomen Tuulivoimayhdistys](#) (association finlandaise de l'énergie éolienne) :
 - statut : absence de retour ;
 - Italie† :
 - Associazione nazionale energia del vento ([Anev](#) — association nationale de l'énergie éolienne) :
 - statut : absence de retour,
 - Agenzia Nazionale per le Nuove tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo economico sostenibile ([ENEA](#) — agence nationale des nouvelles technologies, de l'énergie et du développement économique durable) :
 - statut : absence de retour ;
 - Pays-Bas*† :
 - Nederlandse WindEnergie Associatie ([NWEA](#) — association néerlandaise de l'énergie éolienne) :
 - statut : absence de retour,
 - Rijksdienst voor Ondernemend Nederland ([RVO](#) — agence néerlandaise pour les entreprises) :
 - statut : absence de retour,
 - [Windpower.nl](#) (magazine néerlandais consacré à l'énergie éolienne) :
 - statut : absence de retour ;
 - Royaume-Uni† :
 - [RenewableUK](#) (anciennement British Wind Energy Association, BWEA) :
 - statut : absence de retour ;
 - Suède :
 - [Svensk Vindenergi](#) (association suédoise de l'énergie éolienne) :

- absence d'information auprès de cet acteur mais Svensk Vindenergi s'intéresse à ces questions et a récemment engagé un travail similaire pour ses entreprises membres,
- [Svensk Vindkraft](#) (association suédoise de l'énergie éolienne) :
 - absence d'information auprès de cet acteur.

* pays ayant interdit l'enfouissement des pales

† pays inclus dans le périmètre de l'étude de [WindEurope](#) (novembre 2020, déjà citée plus haut) sur le démantèlement des éoliennes terrestres.

À noter que les diverses organisations mentionnées ci-avant ont été sollicitées au regard de l'ensemble des questions posées par le cahier des charges de la présente étude RECORD.

Dans le même esprit (et avec les mêmes interrogations), WindEurope a été sollicitée. Mais les réponses apportées sont en demi-teinte, dans la mesure où, pour l'interlocuteur au sein de WindEurope (jugant les questions fort pertinentes !), fournir ce type d'informations très détaillées est quelque chose que WindEurope ne fait que pour ses membres de premier plan — et même dans ce cas, pas systématiquement. WindEurope renvoie vers des documents généraux publiquement disponibles (et déjà tous identifiés par les auteurs) mais fournit toutefois quelques éléments de réponses plus spécifiques — restitués ci-après dans les différentes sections.

Il convient de noter par ailleurs que pour certaines des questions posées, WindEurope n'est pas toujours en mesure de répondre, simplement parce que les informations recherchées ne sont pas disponibles. Et dans certains cas, WindEurope – association professionnelle – est également tenue de respecter la loi applicable à la collecte de ces informations.

Sur le sujet de la répartition massique entre les différentes voies, WindEurope déclare ne pas disposer d'une vue d'ensemble de la façon dont chaque composant d'un parc éolien est traité après le démantèlement, les entreprises n'étant pas tenues d'en rendre compte au public (uniquement aux autorités locales, le cas échéant). La situation dépend également de divers facteurs, notamment : l'état de l'actif, les prix des matériaux (par exemple, la valeur de la ferraille), la demande du marché pour les composants d'occasion et les exigences réglementaires. Des preuves anecdotiques suggèrent que les éoliennes mises hors service en Belgique sont principalement destinées au marché de l'occasion. Alors qu'au Danemark, on apprécie la valeur de ferraille des métaux. D'après les évaluations du cycle de vie, WindEurope estime que 85 à 90 % d'une éolienne est aujourd'hui recyclable.

Revenant brièvement sur le cas des États-Unis, il a été indiqué plus haut (cf. supra, section Choix des pays cibles) que cette géographie n'apparaît pas exemplaire en matière de devenir des éoliennes mises hors service.

Selon cette [étude](#) (accès payant — accès gratuit [ici](#)) du NREL (Aubryn Cooperman et al., 2021 — autrice déjà citée plus haut), aux États-Unis, la masse cumulée des pales démantelées atteindra 1,5 million de tonnes en 2040 et 2,2 Mt d'ici 2050. À l'échelle fédérale, 235 000 pales d'éoliennes seront mises hors service d'ici 2050, sur la base d'une durée de vie de 20 ans, selon cette étude. Entre 3 000 et 9 000 pales seront démantelées chaque année pendant les 5 prochaines années aux États-Unis, puis le nombre de pales en fin de vie augmentera entre 10 000 et 20 000 jusqu'en 2040 (pic) et diminuera après 2040 — mais les pales seront plus grandes que celles actuellement mises hors service. Pour Aubryn Cooperman, contrairement à l'Europe où les coûts d'élimination sont élevés et l'espace dans les décharges limité, la mise en décharge reste une option intéressante aux États-Unis (coût limité, espace disponible). Outre la mise en décharge, l'autre option est le coprocessing en cimenteries, un traitement proposé par Veolia North America dans son centre de recyclage basé dans le Missouri.

Par ailleurs, cet [article](#) de l'Iowa Capital Dispatch du 17 août 2022 rapporte la découverte — ayant mené à une enquête — par l'Iowa Utilities Board (IUB, régulateur de services publics) de multiples dépôts de stockage sauvage d'éoliennes pendant plusieurs années par l'entreprise Global Fiberglass Solutions Inc. (GFSI). GFSI a fait l'objet de deux ordonnances administratives de l'Iowa Department of Natural Resources en décembre 2020 et avril 2021, mettant en demeure l'entreprise de traiter ou de retirer les pales — ce que GFSI a [fait](#) de fin 2021 à début 2022 pour un des trois sites visés par l'enquête.

Sur le chapitre du devenir des éoliennes en fin de vie, des compléments sont consultables dans ce [rapport](#) du CGEDD/CGEIET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. 1^{re} partie, Situation en France) pour trois pays européens :

- aux Pays-Bas : annexe 6, pages 68 à 77 ;
- au Danemark : annexe 7, pages 78 à 80 ;
- en Allemagne : annexe 8, pages 81 à 88.

1.2.3 - Réglementation relative à la fin de vie des éoliennes

Cette partie vise à dresser un état des lieux du cadre réglementaire et des soutiens en vigueur concernant le repowering, le démantèlement, le stockage, le transport et le recyclage des composants issus des installations éoliennes.

Interrogée sur ces questions, WindEurope indique qu'il n'existe pas de cadre européen global traitant spécifiquement du démantèlement des parcs éoliens mais que la politique de l'Union européenne en matière de déchets reste de haut niveau. Les exigences réglementaires spécifiques à l'éolien sont fixées aux niveaux national, régional, voire local. WindEurope renvoie à ce [document](#) d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres, publié en novembre 2020 (déjà cité plus haut), l'objectif étant d'établir une norme IEC (International Electrotechnical Commission).

Les réglementations en vigueur portent sur 3 grands chapitres (cf. [WindEurope](#)) :

- le démantèlement des machines et de leurs fondations ;
- la gestion des déchets générés ;
- la remise en état du site.

Le démantèlement des éoliennes est réglementé par les législations nationales.

En Allemagne, le démantèlement des éoliennes est régi par la loi fédérale de 2017 sur les énergies renouvelables EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz). Certaines dispositions relèvent également du Code de la construction BauGB (Baugesetzbuch). Voir également cette [présentation](#) faite le 12 mars 2020 à Berlin, lors d'une [conférence](#) organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie, en France et en Allemagne (cf. [programme](#) de cette conférence), dans lequel Petra Weißhaupt — Agence fédérale de l'environnement UBA (Umweltbundesamt) — rappelle les grandes lignes du cadre légal relatif au démantèlement et au recyclage des éoliennes en Allemagne.

Au Danemark, c'est la commune qui fixe les conditions de démantèlement des éoliennes dans le permis de construire et d'exploiter initialement délivré. Le démantèlement doit débuter au plus tard 1 an après l'arrêt de l'exploitation du parc éolien.

En Espagne, il n'existe pas de cadre réglementaire sur le démantèlement des éoliennes. Toutes les exigences de déclassement sont incluses dans l'étude d'impact environnemental pour chaque projet.

En Italie, le démantèlement des éoliennes est régi par l'arrêté ministériel du 10 septembre 2010 relatif à l'autorisation des centrales électriques alimentées par des sources renouvelables (Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili).

Au Royaume-Uni, les exigences en matière de démantèlement sont fixées dans les conditions de planification de chaque projet ayant reçu l'autorisation. La plupart des projets auront convenu d'une « garantie de démantèlement » avec l'autorité de planification locale au moment de l'autorisation de planification pour couvrir les coûts de démantèlement.

Aux Pays-Bas, enfin, le démantèlement des éoliennes relève du décret sur la construction de 2012 (Bouwbesluit).

En matière de déchets, la directive-cadre ([directive 2008/98/CE](#)) de l'Union européenne sur les déchets définit les concepts de base liés à la gestion des déchets. Cette directive-cadre établit également la hiérarchie des déchets, fixant un ordre de priorité applicable à la législation et aux politiques en matière de prévention et de gestion des déchets (voir supra, dans la 1^{re} partie de l'étape 1, section Devenir des éoliennes en fin de vie).

En matière d'économie circulaire, la Commission européenne a par ailleurs adopté en 2020 un [plan d'action sur l'économie circulaire](#), en cohérence avec le Pacte vert pour l'Europe ([European Green Deal](#)).

Le cadre législatif relatif aux principales catégories de déchets et matériaux issus du démantèlement des éoliennes en fin de vie est présenté ci-après, par catégorie.

Gestion des déchets de béton - La plupart des pays européens n'ont pas de législation explicite concernant les fondations des éoliennes, mais les déchets de béton (code 17 01 01 dans la nomenclature des déchets) relèvent de la catégorie des déchets de construction et de démolition. Selon la directive relative aux déchets de l'Union européenne ([directive 2008/98/CE](#) — cf. article 11, Réemploi et recyclage), au moins 70 % en poids des déchets de construction et de démolition non dangereux doivent être réutilisés ou recyclés à partir de 2020.

En Allemagne, ce point n'est pas traité dans le rapport de [WindEurope](#) de novembre 2020 (déjà cité plus haut). Mais la directive a bien été transposée en droit national en 2012 par la loi sur l'économie circulaire et la gestion des déchets KrWG (Kreislaufwirtschaftsgesetz).

Au Danemark, l'article 2, paragraphe 2, de la loi de 2016 sur la protection de l'environnement stipule qu'il appartient aux municipalités de fixer et adopter des règles concernant le tri des déchets de construction et de démolition, l'affectation de ces déchets et la notification de leurs quantités.

En Espagne, la gestion des déchets de construction et de démolition est régie par le décret royal (Real Decreto) 105/2008 du 1^{er} février 2008.

En [Italie](#), les principaux textes législatifs sur la gestion des déchets de construction et de démolition sont le décret législatif (modifié) 152/2006 relatif aux normes environnementales (Norme in materia di ambiente — Codice ambiente), ainsi que l'arrêté ministériel (modifié) 5/2/98 relatif à l'identification des déchets non dangereux soumis à des procédures de récupération simplifiées (Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22).

Au Royaume-Uni, il n'y a pas de législation spéciale sur l'élimination des fondations d'éoliennes terrestres.

Aux Pays-Bas, enfin, en vertu de la législation néerlandaise (cf. [LAP3](#)), le béton provenant de la rénovation ou de la démolition de bâtiments, de routes et d'autres infrastructures doit être recyclé ou réutilisé.

Gestion des déchets de métaux - La directive européenne [2008/98/CE](#) (cf. article 10, Valorisation, paragraphe 2), stipule que « les déchets sont collectés séparément, pour autant que cette opération soit réalisable d'un point de vue technique, environnemental et économique, et ne sont pas mélangés à d'autres déchets ou matériaux aux propriétés différentes » et que « la collecte séparée est instaurée — en 2015 — au moins pour : le papier, le métal, le plastique et le verre » (cf. article 11, Réemploi et recyclage, paragraphe 1, alinéa 3). Les métaux issus des éoliennes doivent donc être séparés. Ce même article 11 (paragraphe 1, alinéa 2) stipule que « les États membres prennent des mesures pour promouvoir un recyclage de qualité et, à cet effet, mettent en place des collectes séparées des déchets lorsqu'elles sont réalisables et souhaitables d'un point de vue technique, environnemental et économique afin de respecter les normes de qualité nécessaires pour les secteurs concernés du recyclage ».

L'Allemagne suit la directive sur les déchets 2008/98/CE pour le traitement des métaux — directive transposée dans l'ordonnance sur les déchets commerciaux GewAbfV (Gewerbeabfallverordnung).

Au Danemark, la loi de 2016 sur la protection de l'environnement stipule qu'il appartient aux municipalités de fixer et adopter des règles concernant le tri des déchets de métaux, l'affectation de ces déchets et la notification de leurs quantités — situation analogue à celle des déchets de béton.

L'Espagne suit la directive 2008/98/CE pour le traitement des métaux, transposée dans la loi 22/2011 (Ley 22/2011) sur les déchets et les terres contaminées. Les régions ont également leur propre législation.

En Italie, le décret législatif (decreto legislativo) n. 205 du 3 décembre 2010 transpose la directive-cadre européenne sur les déchets.

Le Royaume-Uni suit la directive 2008/98/CE pour le traitement des métaux. Depuis le 1^{er} janvier 2015, la réglementation britannique sur les déchets oblige les entreprises à séparer les matières recyclables des autres déchets.

Aux Pays-Bas, enfin, en vertu du Sectorplan 12 ([Metalen](#)) du Plan national de gestion des déchets (cf. [LAP3](#)), tous les métaux (ferreux et non ferreux) doivent être amenés à une usine de recyclage pour y être traités.

Gestion des déchets de composites - Les déchets de pales sont couramment — bien que non exclusivement, comme le note cette [étude](#) (déjà citée plus haut) publiée en mai 2020 conjointement par le Cefic, l'EuCIA et WindEurope — classés dans la catégorie des déchets plastiques de construction et de démolition (code 17 02 03 dans la classification européenne des déchets). À noter que le fait d'avoir une classification différente des déchets au niveau européen, entraînant une diversification des flux de déchets au détriment d'un flux unique, est susceptible de limiter le potentiel pour un marché paneuropéen des composites recyclés. Le document d'orientation de [WindEurope](#) note qu'il n'existe que peu d'exigences réglementaires pour le secteur des déchets composites, en dépit d'une volonté politique vers plus de circularité. Seuls quatre pays européens font clairement référence aux déchets composites dans leur législation (Allemagne, Autriche, Pays-Bas, Finlande) — ces pays interdisant l'enfouissement ou l'incinération des composites.

En Allemagne, une interdiction d'enfouir directement les déchets dont la teneur organique totale est supérieure à 3 % est entrée en vigueur en 2009. À cause de leur composition (matrice organique), les pales des éoliennes en fin de vie ne peuvent être enfouies. Cette contrainte réglementaire est à l'origine du développement, en Allemagne, du traitement des déchets de pales à base de fibres de verre par coprocessing, en cimenteries. Une usine de cotraitement créée dans le nord de l'Allemagne utilise environ 15 000 tonnes de déchets composites par an, les deux tiers provenant de pales d'éoliennes. L'usine a une capacité totale de plus de 30 000 t/an, pour un coût de traitement d'environ 150 €/t, selon cette même [étude](#). En octobre 2019, l'Agence fédérale de l'environnement UBA (Umweltbundesamt) a publié cette [étude](#) (en allemand, [CP](#) du 1^{er} novembre 2019 en anglais) relative au cadre légal, aux techniques de démantèlement disponibles et au développement d'un concept de responsabilité organisationnelle en matière de fin de vie des éoliennes terrestres. L'UBA y formule des recommandations pour la mise en place d'un système de démantèlement efficace, préconisant notamment d'inclure des éléments spécifiques de responsabilité du produit pour les fabricants d'équipement d'origine OEM (Original Equipment Manufacturers), à savoir :

- obligations d'information et d'étiquetage concernant la composition des matériaux des pales du rotor ;
- traitement séparé dans le but d'assurer la qualité des recyclats et des combustibles de substitution ;
- obligation de recyclage de haute qualité ou garantie de sécurité de l'élimination ;
- inclusion du savoir-faire du fabricant et des technologies de transformation adaptées à l'évolution technologique liée au produit ;
- répartition des coûts d'élimination en fonction des voies et obligations organisationnelles lors de l'élimination.

Mais cette étude de l'UBA met également en évidence plusieurs freins à l'introduction d'une responsabilité produit spécifique pour les pales de rotor, en particulier :

- nombre de fabricants d'éoliennes sont actifs à travers l'Europe et une réglementation isolée en Allemagne — certes possible — est en contradiction avec l'idée fondamentale du marché intérieur de l'Union européenne ;
- format et lieu de stockage (fabricant, opérateur, autorité), ainsi que aspects concurrentiels des données collectées ;
- les longues durées de vie des pales de rotor sont un obstacle à la notion de responsabilité ;
- la discussion sur les options d'élimination des composites (renforts à base de fibres de verre ou de carbone) n'est pas propre aux pales mais s'étend également à d'autres produits fabriqués à partir de ces matériaux et semble devoir être abordée plus spécifiquement pour les flux de matériaux que pour les produits.

En définitive, il n'y a pas d'initiative législative en Allemagne concernant la question de la responsabilité élargie des producteurs (REP) pour le recyclage des pales. En 2020, l'UBA a lancé une nouvelle étude sur 2 ans concernant l'élaboration de normes relatives au démantèlement et au recyclage des pales d'éolienne. Les [résultats](#) de cette étude, publiés au cours de l'été 2022, seront examinés au titre de l'étape 2.

Aux Pays-Bas, dans le cadre de la 3^e édition du Plan national de gestion des déchets [LAP3](#) (Landelijk afvalbeheerplan), la mise en décharge des déchets composites est interdite « en principe ». Cependant, les exploitants de parcs éoliens peuvent bénéficier d'une « exemption » si les solutions alternatives sont jugées trop coûteuses, c'est-à-dire lorsque le coût de traitement est supérieur à la

valeur de référence de 200 €/t. Pour mémoire, les auteurs du [rapport](#) du CGEDD/CGEIET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. 1^{re} partie, Situation en France) écrivaient que, « en réalité, l'enfouissement est presque dans tous les cas privilégié en raison d'absence d'alternatives durables et abordables, les matériaux composites n'étant même pas acceptés par les installations d'incinération car ils contaminent les incinérateurs ». Et selon WindEurope (cette [étude](#)), le coût du recyclage mécanique des pales d'éoliennes aux Pays-Bas oscille entre 500 et 1 000 €/t, y compris la prédécoupe des pales sur site, le transport et le traitement. Le recyclage mécanique lui-même coûte entre 150 et 300 €/t. On comprend pourquoi la mise en décharge est quasi toujours pratiquée.

Sur la question de la gestion des déchets de composites, le document d'orientation de [WindEurope](#) ne traite pas les pays suivants : Danemark, Espagne, Italie, Royaume-Uni.

Enfin, sur la notion de responsabilité élargie du producteur (REP) appliquée à l'échelle européenne, voir cet [article](#) (pages 4 et 5) relatif à la fin de vie des pales d'éoliennes, publié en 2022 par Justine Beauson, ingénieure à l'université technique du Danemark DTU (Danmarks Tekniske Universitet). Ce même [article](#) propose également un état des lieux de la législation en matière de déchets de pales en Europe (page 5), aux États-Unis (page 5), en Chine (page 5) et des divers dispositifs législatifs ou normatifs (page 5).

Gestion des déchets de terres rares - Les éléments relevant du groupe des terres rares utilisés dans la fabrication des aimants permanents sont le néodyme le terbium (Tb), le dysprosium (Dy) et le praséodyme (Pr). Les aimants composés de néodyme (Nd), fer (Fe) et bore (B) — Nd₂Fe₁₄B — sont utilisés dans les éoliennes. Ces aimants contiennent 29 % de néodyme et 1 à 1,5 % de dysprosium. Les terres rares sont répertoriées comme déchets non dangereux. À ce jour, il n'existe pas (encore) de législation européenne ou nationale spécifique relative aux terres rares. Mais voir en 3^e partie, le projet de règlement CRMA (Critical Raw Materials Act).

Gestion des déchets de câbles électriques - La [directive 2012/19/UE](#) du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE, cf. article 2, Champ d'application, paragraphe 4c) stipule que « la présente directive ne s'applique pas aux grosses installations fixes, à l'exception de tout équipement qui est présent dans de telles installations, mais n'est pas spécifiquement conçu et monté pour s'intégrer dans lesdites installations ». En vertu de l'annexe VII de cette directive, les « câbles électriques extérieurs » « doivent être extraits de tout DEEE faisant l'objet d'une collecte séparée » et être « éliminés ou valorisés conformément à la directive 2008/98/CE ».

Gestion des déchets d'huiles usagées - La directive 2008/98/CE (cf. article 21, Huiles usagées) stipule que les huiles usagées doivent être collectées séparément, lorsque cela est techniquement possible, et traitées conformément à l'ordre de priorité des déchets (cf. article 4, Hiérarchie des déchets) et sans danger pour la santé humaine et l'environnement (cf. article 13, Protection de la santé humaine et de l'environnement). Par ailleurs, lorsque cela est techniquement faisable et économiquement viable, les huiles usagées dotées de caractéristiques différentes ne doivent pas mélangées entre elles, ni les huiles usagées avec d'autres déchets ou substances, si un tel mélange empêche leur traitement. Les États membres peuvent en outre appliquer des mesures supplémentaires telles que des exigences techniques, la responsabilité des producteurs, des instruments économiques ou encore des accords volontaires.

En Allemagne, la gestion des huiles usagées est régie par l'ordonnance sur les huiles usagées AltöIV (Altölverordnung) et l'article 19 de la loi fédérale sur l'eau WHG (Wasserhaushaltsgesetz).

Le Danemark suit la directive-cadre 2008/98/CE sur les déchets pour le traitement des huiles usagées, via les dispositions des décrets statutaires sur les déchets. Les huiles usagées sont principalement traitées par régénération et/ou incinération avec valorisation énergétique.

Situation comparable en Espagne, qui suit la directive 2008/98/CE sur les déchets pour le traitement des huiles usagées — transposition dans la loi 22/2011 (Ley 22/2011) sur les déchets et les terres contaminées. Les régions ont également leur propre législation.

En Italie, le décret législatif (decreto legislativo) n. 205 du 3 décembre 2010 transpose la directive 2008/98/CE sur les déchets.

Au Royaume-Uni, il convient de distinguer Angleterre, Écosse, Pays de Galles et Irlande du Nord. Ainsi, en Écosse, au Pays de Galles et en Irlande du Nord, la gestion des huiles usagées est réglementée par le Guide de prévention de la pollution (Pollution Prevention Guidelines), à la section PPG8 (« Safe storage and disposal of used oils »). En Angleterre, la gestion des huiles usagées est régie par la réglementation de 2001 sur le contrôle de la pollution — The Control of Pollution (Oil

Storage) (Angleterre). Cette législation est similaire à celle de l'Écosse, du Pays de Galles et de l'Irlande du Nord.

Aux Pays-Bas, enfin, le Sectorplan 56 (Afgewerkte olie) du Plan national de gestion des déchets (cf. [LAP3](#)) stipule que les huiles usagées provenant des éoliennes doivent être traitées par régénération et/ou incinération avec récupération d'énergie.

La remise en état des sites est réglementée par les législations nationales.

En Allemagne, l'article 35, paragraphe 5, du Code de la construction BauGB (Baugesetzbuch) prévoit les dispositions suivantes : « l'exploitant doit établir une déclaration d'engagement de démantèlement de l'installation et d'enlèvement de tout scellement de sol lors de l'abandon définitif du site ». Le Comité des Länder pour la protection des sols a commandé l'élaboration de directives sur les mesures de protection des sols à respecter lors du démantèlement des éoliennes.

Au Danemark, la commune fixe généralement les conditions de démantèlement dans le permis de construire et d'exploiter initialement délivré. Une exigence courante est d'enlever tous les équipements, y compris les fondations, jusqu'à 1 m sous la surface et de réhabiliter la zone — voir cette [émission](#) Élément Terre (France 24) du 13 janvier 2023 consacrée à la seconde vie des éoliennes, indiquant qu'au Danemark, les fondations ne sont pas entièrement excavées mais recouvertes de terre.

En Espagne, il n'y a pas de cadre réglementaire sur le démantèlement des éoliennes. Toutes les exigences de démantèlement (y compris la restauration du site) sont incluses dans l'étude d'impact sur l'environnement de chaque projet.

En Italie, l'arrêté ministériel du 10 septembre 2010 relatif aux installations d'énergie renouvelable (cf. supra) oblige les producteurs à remettre le site dans son état d'origine.

Au Royaume-Uni, les exigences en matière de démantèlement sont fixées dans les conditions de planification de chaque projet ayant reçu l'autorisation. L'autorité compétente peut inclure des exigences pour la restauration des terres dans un état acceptable dans le cadre du processus d'approbation de la planification.

Aux Pays-Bas, enfin, Il n'existe pas de législation spécifique réglementant l'enlèvement des fondations des éoliennes, les exigences d'enlèvement des fondations étant définies dans les accords entre le propriétaire foncier et l'exploitant du parc.

Il convient de noter que WindEurope propose, depuis le 6 avril 2023, cette [page](#) intitulée « National Policy and Regulatory Developments », consacrée aux évolutions en matière de politique et de réglementation relatives à l'éolien dans les pays européens. Cette section, régulièrement mise à jour, n'est cependant accessible qu'aux membres de l'organisation.

Enfin, dans la réponse (15 octobre 2019) faite à cette [question](#) écrite (1^{er} janvier 2019) de Julien Aubert (député Les Républicains du Vaucluse) à l'Assemblée nationale, relative aux opérations de démantèlement d'éoliennes et aux garanties financières, on peut notamment lire qu'en Allemagne, le montant de la garantie n'est pas défini au niveau national. Chaque Land est compétent pour fixer ce montant en général au prorata du coût de l'investissement, de fabrication ou de construction du projet éolien. Et qu'en Belgique, la réglementation est également spécifique à chaque région.

En Wallonie, par exemple, le cadre de référence pour l'implantation d'éoliennes exige que « l'exploitant d'une éolienne est responsable de son démantèlement et de la remise en état du site à la fin de l'exploitation ». L'administration wallonne précise par ailleurs que les permis pour l'installation des parcs éoliens « contiennent une obligation de constituer une caution ou garantie bancaire, généralement de 80 000 € par éolienne /.../ en vue d'assurer la remise en état du site même en cas de faillite de l'exploitant du parc éolien ».

Repowering

Ce [rapport](#) d'étude de l'Ademe (déjà cité plus haut), publié en juillet 2020, relatif aux stratégies envisageables en matière de renouvellement (repowering) des parcs éoliens terrestres en fin d'exploitation, aborde l'état de l'art des pratiques et perspectives de renouvellement en caractérisant notamment l'état des lieux de la gestion de sortie de contrat de soutien des parcs éoliens à l'échelle européenne. Sous l'angle méthodologique, une synthèse des retours d'expérience à l'échelle européenne a été établie par l'Ademe grâce à une revue bibliographique et une consultation des institutions et personnes ressources associées. Les perspectives d'évolution des parcs éoliens en sortie de contrat ont été identifiées et catégorisées pour permettre la comparabilité des méthodologies

et détailler l'ensemble des types de renouvellement observés. L'état des lieux a été réalisé par une analyse comparée des options et procédures de sortie de contrat de parcs éoliens dans les pays d'Europe les plus avancés sur la question (Allemagne, Danemark, Espagne, Royaume-Uni — notamment — et WindEurope). L'étude s'est concentrée sur différents aspects, en particulier le contexte réglementaire.

Il ressort (cf. WindEurope) que la pyramide des âges des parcs éoliens en exploitation présente de nettes disparités entre les États membres. Le renouvellement des parcs constitue déjà une réalité à l'échelle européenne et on constate au vu de la pyramide des âges des parcs éoliens en exploitation que les pays européens pionniers en éolien ont déjà été confrontés aux problématiques de sortie de contrat d'achat.

Selon l'étude Ademe, l'état des lieux des dispositions existantes fait apparaître que seul le Portugal dispose d'un mécanisme de soutien spécifique au renouvellement opérationnel (cf. illustration ci-après). Par le [décret](#) n.º 43/2019 du 31 janvier 2019, le Portugal a fait le choix de proposer aux propriétaires de parcs un tarif d'achat fixe de 45 €/MWh sur 15 ans. Une procédure simplifiée a été mise en place afin de passer outre la consultation obligatoire de l'équivalent de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) au Portugal, l'entité de réglementation des services énergétiques ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos).



Contexte réglementaire et de soutien existant sur le sujet du renouvellement (repowering) parmi les pays européens (source : [Ademe](#), d'après WindEurope et [Innosea](#), 2020).

L'Italie dispose également d'un système de soutien pour les projets de renouvellement, qui peuvent simplement obtenir un tarif d'achat en participant à des appels d'offres génériques. La définition du renouvellement est néanmoins assez large en Italie, puisque celui-ci comprend la rénovation de l'éolienne, le remplacement complet de la turbine, le changement de certaines pièces uniquement et la remise en service d'éoliennes. L'Italie n'a donc pas été considérée comme présentant un mécanisme de soutien spécifique au renouvellement.

Comme en France, les facteurs de déclenchement d'un renouvellement sont divers à l'échelle européenne, à l'interface entre trois enjeux : outre la réglementation, l'économie des projets et leurs aspects techniques. Le benchmark de l'Ademe a spécifiquement porté sur l'analyse du contexte dans 4 pays : l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne et le Royaume-Uni. Parmi les autres pays européens non étudiés de manière détaillée, l'Italie et les Pays-Bas sont également des pays particulièrement propices à des projets de renouvellement.

Sur la base d'échanges avec WindEurope, les auteurs de l'étude Ademe se sont particulièrement intéressés à l'âge effectif atteint par un parc considéré à l'occasion de son démantèlement. Cette analyse, conduite pour 13 pays européens, révèle que des renouvellements sont survenus avant la fin de la durée de design des turbines (durée de vie technique). On constate également que certains parcs ont été renouvelés avant la fin de leur tarif d'achat. C'est notamment le cas en Allemagne pour laquelle près de 650 MW de projets ont été recensés. Une partie de ces renouvellements est liée à des mécanismes incitatifs spécifiques dans les pays concernés.

Plus précisément, l'âge du renouvellement varie entre 9 ans et 27 ans, ainsi :

- en Espagne, le portefeuille de parcs est renouvelé à l'âge de 22 ans en moyenne ;
- en Allemagne, le portefeuille de parcs est renouvelé à l'âge de 16 ans en moyenne (en lien avec la mise en place d'un mécanisme d'incitation au renouvellement anticipé de 2006 à 2014) ;
- au Danemark, le portefeuille de parcs est renouvelé à l'âge de 20 ans en moyenne ;
- au Royaume-Uni, le portefeuille de parcs est renouvelé à l'âge de 18 ans en moyenne.

La part de renouvellements relativement prématurés s'explique de différentes manières :

- une volonté politique favorable au renouvellement — cas du Danemark et de l'Allemagne, avec une incitation spécifique au renouvellement ;
- un cadre réglementaire flexible vis-à-vis de la rupture anticipée du contrat d'obligation d'achat — au Danemark ou au Royaume-Uni, par exemple, un démantèlement anticipé n'entraîne pas le remboursement d'une partie des subventions d'exploitation perçues (contrairement à la France) ;
- un intérêt les évolutions technologiques — développement de turbines plus puissantes que celles installées 15 ou 20 ans auparavant.

En synthèse, les auteurs de l'étude Ademe constatent une forte disparité des contextes, en particulier réglementaires, pour l'éolien terrestre en Europe, ceux-ci ayant évolué de façon variée au sein des pays considérés. La conséquence de cette disparité s'observe sur les niveaux de contraintes associées à l'extension d'exploitation et au renouvellement donc sur les types de renouvellement envisageables (renouvellement impossible, renouvellement contraint ou non-contraint). Ainsi, on peut observer des divergences sur les aspects suivants :

- gouvernance / objectifs nationaux :
 - o territorialisation des aspects réglementaires (local ou national),
 - o stratégie politique de densification / démantèlement ;
- réglementation des enjeux et des usages :
 - o régime réglementaire et évolutions depuis sa mise en place (règles de distance aux habitations / nuisances sonores / Natura 2000 / radar / patrimoine / paysage / aéronautique),
 - o permis requis pour un nouveau parc – contexte facilité (modification notable ou substantielle),
 - o études nécessaires pour l'extension de durée de vie,
 - o réglementation liée au démantèlement et à la circularité,

- existence d'un unique guichet d'autorisation ;
- sécurisation du foncier et du raccordement :
 - durée des baux et nécessité de les renouveler,
 - acceptabilité sociétale des projets éoliens,
 - processus et délais pour un nouveau raccordement.

Outre le contexte réglementaires stricto sensu, l'étude considère également le contexte économique propre à chaque pays européen, qui dépend fortement du contexte règlementaire, ainsi que du marché de l'électricité, variable d'un pays à l'autre. La conséquence est un équilibre économique différent entre les revenus et les coûts, qui limite une comparaison un à un des projets d'extension et de renouvellement entre les pays, avec une incidence directe sur les résultats de rentabilité. Les auteurs de l'étude Ademe observent notamment les différences suivantes :

- mécanismes de soutien et tarifs d'achat :
 - tarif de l'électricité : rentabilité sur le marché de vente directe de l'électricité,
 - existence d'un bonus renouvellement / démantèlement,
 - mécanisme de support (tarif d'achat / complément de rémunération / etc.) : durée, indexation, limites en termes de quantité d'énergie vendue,
 - possibilité de démanteler avant la fin du contrat d'achat et pénalités éventuelles,
 - existence d'un dépôt de garantie en vue du démantèlement ;
- existence d'autres types de contrats sur le marché de l'électricité :
 - marché prédisposé aux contrats de gré-à-gré ;
- taille du marché de renouvellement ;
- disponibilité de turbines de petite taille pour renouvellement quasi-identique ;
- limite de la rentabilité de projets.

Les auteurs soulignent également que les dispositifs de soutien et les cadres réglementaires varient selon les États membres, notamment en fonction de la maturité de la filière éolienne, de l'atteinte des objectifs en puissance installée et de l'acceptabilité sociétale. Et de noter que l'Allemagne et le Danemark ont mis en place, pour une durée déterminée, un mécanisme incitatif en faveur du renouvellement des parcs éoliens, un dispositif ayant permis de soutenir la densification des parcs et le renouvellement anticipé de turbines obsolètes, dans un contexte de forte pénétration de l'éolien et d'un nombre limité de nouvelles zones propices au développement de l'éolien.

Si plusieurs renouvellements ont eu lieu de manière anticipée en Allemagne, au Portugal et au Royaume-Uni, à l'inverse, les Pays-Bas ont défini des conditions pour avoir accès à un dispositif de soutien : soit avoir une puissance unitaire qui augmente d'au moins 1 MW, soit que la future turbine remplacée ait été exploitée pendant 15 ans à la date du remplacement ou au moins 13 ans avant la demande de soutien (dispositif SDE+ — aujourd'hui remplacé par le [SDE++](#)) — pour le Portugal et l'Italie, voir supra.

Le tableau ci-après présente une synthèse de l'état des lieux réglementaire et terminologique du renouvellement pour une sélection de pays européens.

	Allemagne	Espagne	France	Royaume-Uni	Portugal	Danemark	Pays-Bas	Italie
Puissance installée (GW)	52,9	23,5	15	12,8	5,4	4,4	3,4	10
Age médian de la flotte (an)	10-15	10-15	5-10	5-10	10-15	15-20	5-10	5-10
Nombre de renouvellement recensés par WindEurope (+ autres)	24	4	6 (+ 2)	4 (+ 13)	3	5	4	2
Incitation financière au renouvellement	Non, mais de 2006 à 2014	Non	Non	Non	Tarif fixe de 45€/MWh sur 15 ans pour les éoliennes renouvelées, via une simplification des démarches	Non, mais de 2001 à 2011	Oui, pour une puissance unitaire qui augmente d'au moins 1 MW ou pour remplacer une turbine exploitée pendant 15 ans à la date de remplacement ou 13 ans avant la demande de soutien.	Système de soutien pour le renouvellement via un tarif d'achat obtenu en participant à des appels d'offres
Existence d'une définition du renouvellement	Renouvellement uniquement à l'identique. Sinon, nouveau projet	Pas de définition légale en dehors des modifications substantielles	Précisions apportées dans une circulaire entre modification notable et substantielle	Un renouvellement correspond à un remplacement complet de la turbine. Le remplacement à l'identique est aussi courant.	Pas de définition légale	Le terme renouvellement s'applique à la fois au remplacement et à l'extension de durée de vie.	Un renouvellement correspond à un remplacement complet de la turbine	Un renouvellement correspond à une rénovation, au remplacement complet de la turbine, au changement d'unique certaines pièces et à la remise en service d'éoliennes
Cadre législatif du renouvellement	Permis requis comme pour un nouveau parc	Permis requis comme pour un nouveau parc (pour une modification substantielle)	Permis requis comme pour un nouveau parc (pour une modification substantielle)	Nouveau permis requis en cas de renouvellement non à l'identique	Permis requis pour modifications d'un parc	Permis requis comme pour un nouveau parc	Permis requis comme pour un nouveau parc	Permis requis comme pour un nouveau parc
Spécificités du marché national	Zones de développement éolien	Limite de rentabilité pour le producteur à 7,39 % avant impôts	Pas d'étude nécessaire pour poursuivre l'exploitation au-delà de 20 ans (sous réserve de conformité aux normes de sécurité)	Pas d'étude nécessaire pour poursuivre l'exploitation au-delà de 20 ans		Réduction du nombre de mâts. Régime d'autorisation à l'échelle municipale		
Coûts estimés d'un renouvellement		AEE : « 80-85% du coût d'un parc éolien neuf »		RenewableUK : « CAPEX d'un projet de renouvellement du même ordre de grandeur que celui d'un nouveau projet »				
Coûts estimés d'une extension d'exploitation		AEE : « 10-15% d'un parc éolien neuf »						

Panorama des dispositions liées au renouvellement ou au démantèlement (source : [Ademe](#), d'après WindEurope, 2020).

Pour toutes précisions et détails concernant (notamment) les dispositions réglementaires relatives au repowering dans les 4 pays européens étudiés (Allemagne, Danemark, Espagne, Royaume-Uni), il convient de consulter les annexes du [rapport](#) de l'étude Ademe suivantes :

- fiche Allemagne : annexe 9.2.1, pages 91 à 101 ;
- fiche Danemark : annexe 9.2.2, pages 101 à 109 ;
- fiche Royaume-Uni : annexe 9.2.3, pages 110 à 115 ;

- fiche Espagne : annexe 9.2.4, pages 116 à 121.

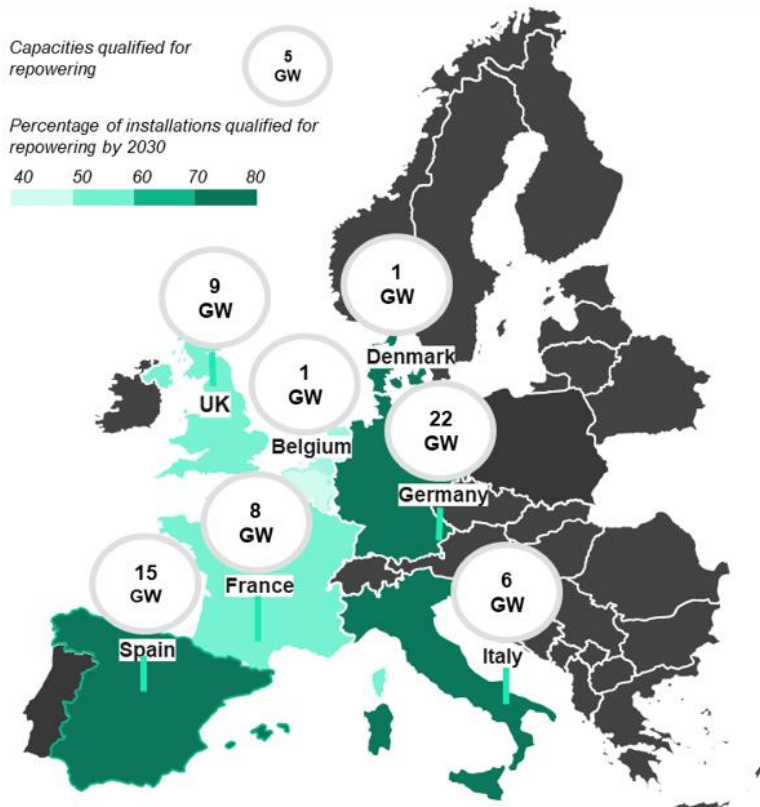
Les thématiques abordées par chacune de ces fiches sont les suivantes (selon un plan quasi identique d'une fiche à l'autre) :

- contexte général de l'éolien et sortie d'achat ;
- régime de soutien à l'énergie éolienne ;
- cadre réglementaire du renouvellement ;
- enjeux économiques liés au renouvellement ;
- enjeux réglementaires et économiques liés à une poursuite d'opération ;
- exemples de renouvellements et d'extensions.

L'importance de rationaliser le processus d'obtention des autorisations de repowering a été identifié au niveau européen. Ainsi, la directive n° 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables ([RED II](#)) reconnaît la nécessité de simplifier les procédures administratives dans leur ensemble et exige un point de contact unique pour les demandes de permis pour les énergies renouvelables. Selon l'article 16, paragraphe 6 de la RED II, « les États membres de facilitent le rééquipement des installations existantes utilisant des sources d'énergie renouvelables en garantissant une procédure d'octroi de permis simplifiée et rapide » et « la durée de cette procédure n'excède pas un an ». La RED II — appelée à devenir RED III — fait actuellement l'objet d'un processus de révision sur la base de cette [proposition de directive](#).

Plus récemment, dans cette [étude](#) publiée en janvier 2022, Sia Partners a réalisé un benchmark des opportunités de repowering en Europe, évaluant notamment les capacités éoliennes qualifiées pour le repowering dans les différents pays européens, l'Allemagne arrivant largement en tête, devant l'Espagne, le Royaume-Uni, la France et l'Italie — des disparités principalement dues à la maturité respective des différents parcs éoliens nationaux — pour un total de près de 65 GW de capacités éoliennes arrivant en fin de vie d'ici 2030 à l'échelle européenne (cf. illustration ci-après).

Seuls les pays disposant de capacités installées importantes et les plus développés d'entre eux ont intégré dans leur réglementation nationale des règles spécifiques régissant la fin de vie des parcs éoliens, ce qui s'explique par l'ancienneté des parcs pour éviter une situation de vide juridique où les parcs ne seraient pas démantelés. Mais partout en Europe, l'exploitant d'un parc est seul responsable légal du démantèlement de ses installations.



Capacités éoliennes qualifiées pour le repowering par pays en Europe, à l'horizon 2030 (source : [Sia Partners](#), d'après l'AIÉ, EurObserv'ER, WindEurope et la Commission européenne, 2022).

Allemagne

L'Allemagne est l'un des premiers pays à s'être engagé dans le repowering et à soutenir le repowering légalement.

Le repowering est considéré comme un instrument de la politique allemande. La loi fédérale sur la protection du climat KSG (Klimaschutzgesetz), votée en juin 2021, vise à faciliter le repowering en facilitant l'homologation de nouvelles éoliennes sur des sites anciens. Les opportunités de repowering devraient donc continuer à se multiplier en Allemagne dans les années à venir pour pouvoir atteindre l'ambitieux objectif (115 GW d'éolien terrestre) fixé pour 2030 — cf. la loi sur les énergies renouvelables (EEG — Erneuerbare Energien Gesetz). En 2020, le repowering représentait près du quart des nouvelles installations allemandes (> 1 GW) (voir encadré ci-après).

Réglementation : les frais, les dispositions financières et les conditions d'excavation des fondations varient selon le Land considéré.

Repowering (et démantèlement) en Allemagne

Selon [RDRWind e.V.](#) (eingetragener Verein — statut juridique de cette entité), une association industrielle pour le repowering, le démantèlement et le recyclage des éoliennes (Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen), comme en France, trois options sont envisageables lorsque les éoliennes atteignent la fin de leur soutien tarifaire de rachat en vertu de la loi EEG en Allemagne : le repowering, la poursuite de l'exploitation ou le démantèlement.

La durée de vie moyenne des turbines correspond à la période de soutien de 20 ans garantie par la loi allemande sur les énergies renouvelables (EEG), même si la plupart des installations sont techniquement capables de continuer à fonctionner bien au-delà de cette période. Ainsi, un premier pic de démantèlement des turbines est attendu vers le début des années 2020 et un autre au milieu des années 2030, en cohérence avec les capacités installées 20 ans plus auparavant.

Dans cette [étude](#) d'octobre 2019 (en allemand) relative au cadre légal, aux techniques de démantèlement disponibles et au développement d'un concept de responsabilité organisationnelle en matière de fin de vie des éoliennes terrestres, l'Agence fédérale de l'environnement UBA (Umweltbundesamt) estimait qu'à fin 2019, il y avait en Allemagne plus de 27 000 éoliennes terrestres installées en Allemagne, rappelant que la période de soutien tarifaire de 20 ans conformément à la loi EEG se termine fin 2020 pour les premières de ces installations. Selon les conditions locales, les

anciennes turbines peuvent être remplacées (repowering) ou leur fonctionnement prolongé lorsque cette option est techniquement possible et économiquement rentable. Une accélération du rythme de démantèlement était attendue à partir de 2021. Sur la base d'une étude de l'état de l'art, du calcul des quantités de déchets et de la prise en compte des aspects financiers, les résultats montrent qu'il existe un risque de goulots d'étranglement dans les capacités de recyclage des composites des pales du rotor, ainsi que des risques pour l'homme et l'environnement en fonction des modalités de démantèlement.

Sous l'angle des capacités de recyclage, la durée de vie moyenne d'une turbine a été supposée être de 20 ans et la possibilité d'une prolongation n'a pas été prise en compte. Selon ces hypothèses, le démantèlement entraînerait principalement des déchets de béton (jusqu'à 5,5 millions de tonnes par an) et d'acier (près d'un million de tonnes par an), en plus du cuivre et de l'aluminium. L'infrastructure de recyclage existante est équipée pour traiter ces quantités mais il existe une incertitude quant au recyclage des pales du rotor, pour lequel les prévisions indiquent des quantités importantes à partir de 2024 (jusqu'à environ 70 000 tonnes par an). Le recyclage est jugé difficile avec une seule installation en Allemagne capable de recycler les déchets de GFRP/CFRP (verre/carbone). L'étude recommande d'examiner si l'introduction d'aspects spécifiques de la responsabilité des déchets pour les pales de rotor pourrait créer une incitation à créer des capacités de recyclage supplémentaires.

L'étude de l'UBA examine aussi les volets protection de l'environnement, sécurité et santé au travail et protection contre le bruit. L'UBA recommande notamment que tout travail de sciage effectué sur le site soit confiné à l'aide d'enceintes dédiées et que l'eau polluée par la poussière soit collectée pour minimiser l'exposition humaine et environnementale.

L'UBA pointe enfin le risque de réserves financières insuffisantes, constituées par l'exploitant pour le démantèlement. Sur la base d'une évaluation des coûts prévus pour le démantèlement, l'étude anticipe des déficits de financement important à partir du milieu des années 2020, le déficit de financement étant estimé à plus de 300 millions d'euros en 2028.

Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) - La loi sur les énergies renouvelables (EEG), introduite en 2000, a été le principal outil législatif allemand pour le développement de l'énergie renouvelable, garantissant notamment à tous les producteurs d'énergie renouvelable un prix fixe supérieur au marché (cf. tarif de rachat) pour 20 ans. Pour les nouvelles installations plus importantes, la réforme de l'EEG a remplacé ce système par des enchères, où les opérateurs soumissionnent pour une part de la capacité renouvelable prévue, les offres les plus basses par kWh étant alors garanties pour les 20 prochaines années dans la plupart des cas de la même manière qu'avec les tarifs de rachat (25 ans pour l'éolien offshore).

Einspeisevergütung (tarif de rachat) - En vertu de la loi EEG, le gouvernement allemand a introduit des tarifs de rachat pour l'énergie renouvelable. Cela signifiait que les propriétaires d'installations d'énergie renouvelable se voyaient garantir un prix fixe et supérieur au marché par kWh pour l'électricité qu'ils injectaient dans le réseau sur une période de 20 ans. Avec la réforme ultérieure, cela a été remplacé par un système d'enchères pour les nouvelles installations au-delà d'une certaine taille — le système allemand de tarifs de rachat a été copié dans d'autres pays du monde (en France par exemple).

Source : Agence fédérale de l'environnement ([UBA](#)).

Sur le repowering, avec un zoom sur un chantier emblématique en Allemagne (projet Elster Repowering), on pourra consulter cet [article](#) paru le 4 octobre 2023 dans [Actu-Environnement](#) — extrait du [hors-série](#) éolien 2023, pages 34 à 38.

Espagne

L'Espagne a été l'un des premiers pays à investir dans l'éolien de sorte que tous les parcs éoliens seront renouvelés (repowering) avant 2030 : 10 GW devront être renouvelés en 2025, 20 GW en 2030 (soit 75 % des parcs éoliens actuels !).

Réglementation : les exigences de démantèlement sont définies au cas par cas.

Royaume-Uni

Le Royaume-Uni possède l'un des parcs éoliens les plus jeunes d'Europe : la grande majorité de la puissance installée a été construite après 2006. Il n'y a pas de soutien des prix ou de subventions depuis 2015 pour les nouveaux projets, les opérateurs britanniques ont préféré prolonger la durée de

vie des actifs existants plutôt que de les remplacer par des turbines de plus grande capacité (repowering). Bien que le repowering à terre puisse stimuler l'expansion de l'industrie éolienne, le manque d'objectifs et d'incitations clairs n'encourage pas la croissance de ce secteur (voir encadré ci-après).

Réglementation : les exigences de démantèlement sont définies au cas par cas.

Repowering au Royaume-Uni

Dans cet [article](#) publié le 19 février 2021, Natasha Peter, avocate au Barreau de Paris, du cabinet Gide, établit un parallèle concernant l'adaptation des procédures d'autorisation pour promouvoir le repowering des installations éoliennes terrestres, entre la France et le Royaume-Uni. Natasha Peter rappelle que l'absence d'un cadre réglementaire favorable a largement été identifiée dans toute l'Europe — y compris en France et au Royaume-Uni — comme l'un des principaux obstacles à la mise en place du repowering. Natasha Peter examine en premier lieu le potentiel du repowering à contribuer (fortement) à la poursuite des objectifs climatiques puis, dans un second temps, considère les régimes d'autorisation s'appliquant à l'énergie éolienne en France et au Royaume-Uni (cf. pages 10 à 13 de l'[article](#) cité) et notamment l'effet dissuasif que ces régimes font peser sur le repowering des parcs éoliens. Au Royaume-Uni, la politique d'aménagement est une question décentralisée et le régime peut varier considérablement entre l'Angleterre, l'Écosse, le Pays de Galles et l'Irlande du Nord. En synthèse, au Royaume-Uni, et à l'instar de la France, l'aide actuellement mise à disposition de l'autorité chargée d'apprécier les demandes de renouvellement reste limitée (cf. pages 15 à 16 de l'[article](#) cité). Natasha Peter conclut en indiquant que pour un promoteur, décider de renouveler une installation éolienne et choisir le moment et la façon de s'y prendre relèvent du calcul économique. Parmi plusieurs éléments (régime de subvention, possibilité technique d'augmenter la capacité de l'installation, etc.), le régime d'autorisation — encourageant l'inertie ou l'innovation dans l'aménagement des installations, la taille des machines, leur puissance, etc. — est un facteur décisionnel clé que le promoteur prend en compte.

À consulter également cet [article](#) de revue (mars 2021, université de Cranfield) relatif aux stratégies de prolongation de la durée de vie des parcs éoliens offshore à l'aide d'évaluations technico-économiques.

Italie

La moitié de la capacité éolienne installée en Italie atteindra la fin de sa vie opérationnelle d'ici 2030, une partie de cette capacité pouvant faire l'objet d'opérations de repowering.

Mais dans sa forme actuelle, le cadre juridique n'offre pas suffisamment de flexibilité à même de simplifier le processus de repowering et de permettre à l'Italie de renouveler ses parcs éoliens vieillissants.

Réglementation : la réglementation nationale exige le démantèlement des éoliennes et l'excavation des fondations de 1 à 3 m sous terre.

Danemark

Au Danemark, l'âge moyen des éoliennes lors de leur mise hors service est de 17 ans.

En raison de la géographie du pays, la population danoise est fortement opposée à l'installation de nouveaux projets terrestres, mais favorable au développement de parcs éoliens offshore et à une réduction drastique du nombre d'éoliennes terrestres — de moitié d'ici 2030. Dans ce contexte, le gouvernement danois opte pour le renouvellement (repowering) avec des éoliennes moins nombreuses mais plus puissantes et de hauteurs similaires, plutôt que d'allonger la durée de vie des machines en fin de vie.

Réglementation : Le Danemark reconnaît l'extension dans sa réglementation, et fixe les exigences de démantèlement au cas par cas.

Belgique

Le potentiel de repowering y est limité en raison du faible nombre d'éoliennes installées au cours des 20 dernières années.

Le gouvernement fédéral est seul responsable de la fixation des objectifs de développement pour les parcs éoliens offshore, mais les parcs éoliens terrestres relèvent de la compétence des autorités régionales.

Le repowering des parcs éoliens terrestres n'est pas à l'ordre du jour car l'industrie éolienne belge est assez jeune, n'ayant réellement décollé que depuis une dizaine d'années.

Une législation spécifique traitant du démantèlement n'existe pas en Belgique.

Sur le chapitre de la réglementation relative à la fin de vie des éoliennes, des compléments sont consultables dans ce [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. 1^{re} partie, Situation en France) pour trois pays européens :

- aux Pays-Bas : annexe 6, pages 68 à 77 ;
- au Danemark : annexe 7, pages 78 à 80 ;
- en Allemagne : annexe 8, pages 81 à 88.

1.2.4 - Chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes

Cette partie vise à fournir une description de la chaîne séquentielle des opérations relatives à la fin de vie des éoliennes, depuis la mise hors service d'un parc éolien jusqu'aux différentes voies de démantèlement, de réemploi, de réutilisation, de recyclage et valorisation des divers éléments constitutifs des éoliennes, en indiquant les principaux acteurs et parties prenantes positionnés sur les différents maillons de cette chaîne de valeur.

À l'échelle européenne (revue de presse et d'Internet, [WWEA](#) avec [Business in Wind](#)) et dans le monde (États-Unis), la chaîne séquentielle des opérations relatives à la fin de vie des éoliennes est analogue à celle décrite en 1^{re} partie.

À cet égard, les auteurs de ce [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. 1^{re} partie, Situation en France) décrivent succinctement l'enchaînement des opérations en fin de vie des éoliennes (et des principaux acteurs), en abordant le recyclage des éoliennes dans trois pays européens :

- aux Pays-Bas : annexe 6, pages 68 à 77 ;
- au Danemark : annexe 7, pages 78 à 80 ;
- en Allemagne : annexe 8, pages 81 à 88.

Selon l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (voir [Ofate 2019](#)), le processus de démantèlement d'une éolienne comprend en règle générale les étapes suivantes :

- travaux préparatoires (études, planification) ;
- enlèvement des composants électroniques et nettoyage de l'installation (résidus de liquide de frein, lubrifiants, etc.) ;
- démontage de l'éolienne, broyage partiel sur place (en particulier du mât) et transport ;
- enlèvement des équipements électriques à proximité de l'installation (câbles, postes de transformation, etc.) ;
- excavation des fondations, remise en état des chemins d'accès et des surfaces sur lesquelles la grue est intervenue, restauration de la qualité initiale du sol ;
- valorisation ou élimination des matières résiduelles résultantes (valorisation thermique, recyclage, downcycling comme matériau de remblayage, etc.).

Le démantèlement de l'éolienne et des installations connexes, ainsi que la restauration de la qualité initiale du sol, d'une part, et l'élimination ou le recyclage des matières résiduelles, d'autre part, sont souvent effectués séparément par des sociétés (filiales) spécialisées dans l'une des étapes du processus de démantèlement. Pour le démontage de l'installation, les techniques faisant intervenir une grue sont plus respectueuses de l'environnement que le dynamitage ou le démontage de l'installation par chute. Le procédé utilisé et les coûts associés dépendent notamment du type de mât utilisé (en acier, en treillis ou hybride — dans ce dernier cas, boule de démolition, cisaille de démolition, découpe en segments. Et pour le béton et l'acier, il existe déjà des techniques de collecte et de traitement des déchets sans surcoût qui permettent d'économiser les ressources. Ainsi, le béton broyé peut servir à combler le sol lors de la construction de routes. De même, des circuits de collecte et de traitement des métaux présents dans la nacelle ont été mis en place.

Dans ce [document](#) d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres, publié en novembre 2020 (déjà cité plus haut), WindEurope fournit un exemple de plan de démantèlement (« decommissioning plan ») très détaillé, élaboré sur la base de l'expérience allemande (voir encadré ci-après).

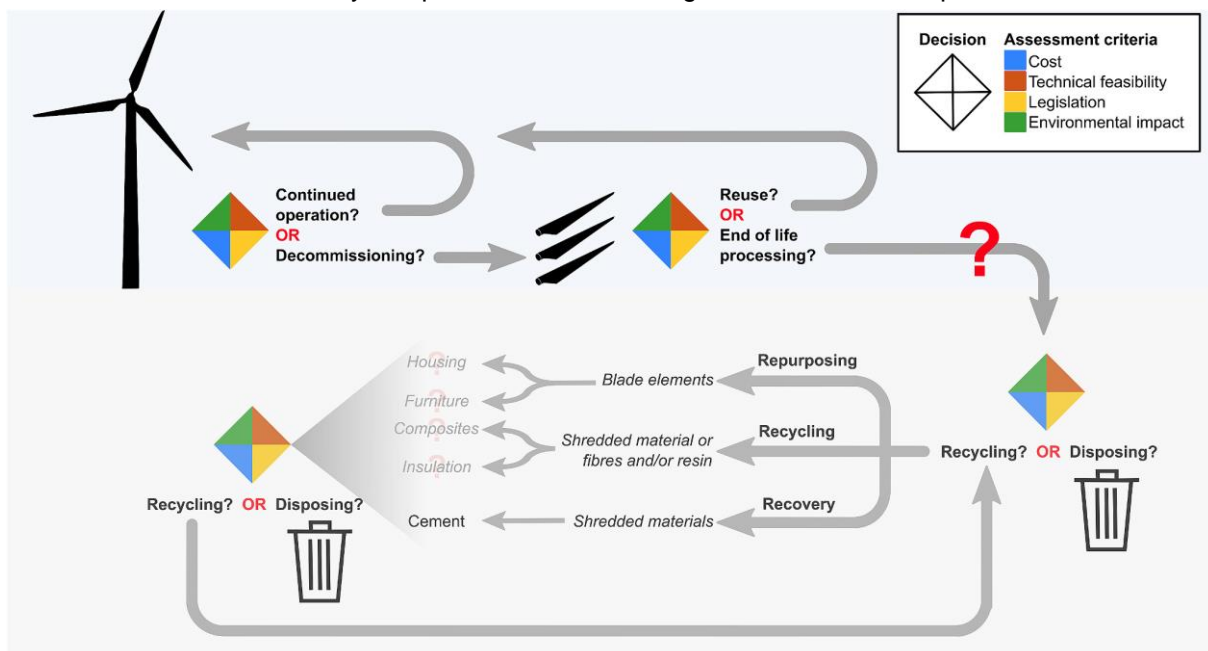
Plan de démantèlement
3-DECOMMISSIONING PLAN
3.1. PROJECT MANAGEMENT
3.1.1. OPERATING COMPANY
3.1.2. DISMANTLING COMPANY
3.1.3. WASTE MANAGEMENT COMPANY
3.1.4. AUTHORITY
3.2. DESCRIPTION OF ACTIVITIES
3.2.1. PLANNING OF DISMANTLING AND DISPOSAL
3.2.1.1. DECISION ON CONSIDERATION OF DECOMMISSIONING AND DISMANTLING
3.2.1.2. DEFINITION OF THE EXTENT OF DECOMMISSIONING AND DISMANTLING
3.2.1.3. DETERMINATION OF FURTHER USE OF THE DISMANTLED WTG
3.2.1.4. REVIEW OF EXISTING RESTRICTIONS, LIMITATIONS, CONDITIONS, OBLIGATIONS
3.2.1.5. DRAWING UP A CATALOGUE OF ACTIVITIES TO COMPLY WITH EXISTING RESTRICTIONS, LIMITATIONS, CONDITIONS, OBLIGATIONS
3.2.1.6. ASSESSMENT AND VALUATION OF THE DISMANTLING OBJECT (INVENTORY)
3.2.1.7. DETERMINING AND PLANNING OF DISMANTLING PROCEDURES
3.2.1.8. DETERMINING AND PLANNING OF DISPOSAL
3.2.2. TENDERING AND AWARDED
3.2.3. EXECUTION PLANNING – PREPARATORY WORKS
3.2.3.1. CHECK OF CONDITIONS BEFORE STARTING DISMANTLING
3.2.3.2. PREPARATION OF RISK ASSESSMENT
3.2.3.3. CONSTRUCTION SITE KICKOFF - RESPONSIBILITIES AND CONSTRUCTION SCHEDULE
3.2.4. EXECUTION AND MONITORING – CONSTRUCTION SITE WORKS
3.2.4.1. START OF DISMANTLING - SETTING UP THE CONSTRUCTION SITE
3.2.4.2. BRIEFING ON DISMANTLING COMPLIANCE WITH REMOVAL INSTRUCTIONS, HEALTH AND SAFETY REQUIREMENTS
3.2.4.3. PROFESSIONAL* DECOMMISSIONING OF THE WTG
3.2.4.4. PREPARATORY WORK FOR DISMANTLING THE WTG
3.2.4.5. PROFESSIONAL* DISMANTLING OF THE WTG UP TO THE TOP OF THE FOUNDATION
3.2.4.6. PROFESSIONAL* DISMANTLING OF THE FOUNDATION
3.2.4.7. PROFESSIONAL* DISMANTLING OF THE INFRASTRUCTURE/BALANCE OF PLANT EQUIPMENT
3.2.4.8. PROPER DISPOSAL
3.2.4.9. RESTORATION OF THE ORIGINAL STATE OF THE LAND
3.2.5. ACCEPTANCE
3.2.5.1. PERFORMANCE ACCEPTANCE
3.2.5.2. RECEIPT OF FINAL DOCUMENTATION
3.2.5.3. EXECUTION OF SETTLEMENT OR PAYMENT
3.3. DATA REQUIREMENTS
3.4. PERMITTING FORMALITIES
3.5. COMMUNICATION PLAN (exemple France)
3.6. ENVIRONMENT, HEALTH AND SAFETY
Source : WindEurope , pages 16 à 29.

Dans le cas particulier des pales, cet [article](#) de Justine Beauson, ingénieure à l'université technique du Danemark DTU (Danmarks Tekniske Universitet, [DTU Wind](#) - Department of Wind and Energy Systems), relatif à la fin de vie des pales d'éoliennes, paru en mars 2022 dans *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, passe en revue les différents points suivants à l'échelle européenne :

- chaîne des processus des pales d'éoliennes en fin de vie (chaîne de valeur) ;
- estimation et prévision du volume de déchets de pales d'éoliennes ;
- législations et normes ;
- processus techniques ;
- besoins de solutions ;
- potentiels de l'économie circulaire et de l'ingénierie du cycle de vie.

Les auteurs présentent notamment un schéma de chaîne de valeur de la fin de vie des éoliennes et de leurs pales (cf. illustration ci-après), qui décrit la décision à prendre vers la fin de vie des équipements. Les critères de décision pris en considération sont : le coût, la faisabilité technique, la législation et les impacts environnementaux. Le diagramme proposé est séparé en deux grandes phases :

- une première, phase qui comprend la poursuite des opérations et le réemploi :
 - o tant que les critères de décision sont remplis, les pales restent des pales et sont mises en œuvre pour les éoliennes ;
- dans une deuxième phase, les pales sont recyclées et transformées en nouveaux matériaux ou éliminées, selon l'évaluation faite des critères :
 - o à ce stade, il n'y a actuellement aucun moyen de revenir à la première phase, car il est très peu probable que les matériaux récupérés des pales puissent être réutilisés dans les pales,
 - o l'élimination, y compris la mise en décharge, est la dernière étape du schéma.



Chaîne de valeur de la fin de vie des (pales d')éoliennes (source : [J. Beauson et al., 2022](#)).

En complément de ce schéma de chaîne de valeur, les auteurs présentent, dans une matrice de décision, des exemples de questionnements envisagés pour chaque décision (cf. illustration ci-après).

Decisions	Economic	Technical feasibility	Legislation	Environmental impacts
Decommissioning OR continued operations?	Is it profitable to continue operating the turbine?	What is the damage state of the wind turbine blades?	Can the turbine continue its operations where it is installed?	What are the environmental impacts of continuing the operations vs decommissioning?
Reuse OR end-of-life processing?	Can the blade be sold as spare parts?	What is the damage state of the wind turbine blades?	Are there legislation preventing reuse (second hand market)?	What are the potential environmental impacts of extending the lifetime of the blade by reusing it?
Recycling OR disposing?	What is the landfill tax? What is the value of the materials in the wind turbine blades and the recycled ones?	Is it possible to recover materials with properties and quality valuable to any applications?	Are there legislation preventing landfill? Are there legislation on the use of recycled wind turbine blade materials for targeted applications?	What are the potential environmental benefits and impacts of recycling the blades vs. disposing them?

Matrice de décision (source : [J. Beauson et al., 2022](#)).

Exemples d'acteurs

Selon les réponses faites par WindEurope, plusieurs acteurs sont habituellement impliqués dans le démantèlement des éoliennes. Il s'agit notamment du propriétaire de l'éolienne ou du parc éolien complet, de la société d'exploitation du parc éolien, de la société de démantèlement, de la société de gestion des déchets et des autorités compétentes. Il peut exister des variations de la chaîne de valeur selon le pays, les composants ou encore les matériaux, mais WindEurope ne cartographie pas les différentes options. Les organisations présentes dans les différents pays européens — mentionnées ci-avant à la section Devenir des éoliennes en fin de vie — ont été sollicitées dans ce sens (en attente d'un retour).

Allemagne

[Roth International](#) est une entreprise allemande spécialisée dans le démantèlement et la démolition, le découpage, le démontage, le recyclage, l'élimination, le stockage et le service pour divers secteurs industriels, en particulier l'éolien (terrestre, offshore) — [démantèlement et démontage](#) des turbines, [découpage](#) des pales sans étincelles, sans poussière et sans fragmentation, découpage des [composites](#) à base de fibres de verre ou de carbone, [décomposition](#) des éoliennes, [démontage](#) des pales, [traitement](#) des composites à base de fibres de verre ou de carbone, [recyclage et valorisation](#) des turbines, [recyclage](#) des pales des rotors, [recyclage et valorisation](#) des composites à base de fibres de verre ou de carbone, [élimination](#) des matériaux d'éoliennes, [élimination](#) des matériaux de pales, [élimination](#) des matériaux composites à base de fibres de verre ou de carbone.

En tant que partenaire full-service pour le démantèlement, l'élimination et le recyclage des éoliennes de parcs éoliens complets, l'entreprise allemande [NEOcyce](#) propose notamment les prestations suivantes :

- démantèlement et élimination du parc éolien : contrôles et enlèvement ou réparation des voies d'accès, plateformes de grues, réservation de grues et démantèlement incluant élimination et recyclage des éoliennes ou la revente, etc. ;
- collecte, transport et logistique : démontage juste à temps évitant un stockage sur site ou des frais de location de grue supplémentaires, obtention de tous les permis de transport nécessaires inclus, etc.
- permis de démolition et enlèvement : demandes et obtention de tous les permis locaux nécessaires et approuvés pour le processus de démantèlement, d'enlèvement et d'élimination, etc. ;
- recyclage et élimination : élimination dans le respect de l'environnement et recyclage de tous les matériaux d'éoliennes, certifications pour chaque pièce et matériau d'éoliennes, etc. ;
- enlèvement des fondations : démolition des fondations, séparation de l'acier, des métaux, des plastiques et de tous les autres matériaux retirés du béton, etc. ;

- renaturalisation et remise en état du site : enlèvement et restauration des voies d'accès, des allées, des plates-formes de grue, remplissage des trous de fondation et restauration du terrain et de la couche arable dans son état d'origine.

Cette [page](#) fournit des indications sur les prix pratiqués pour le démantèlement, ainsi que pour l'extraction et l'élimination des fondations, en ce en fonction de la hauteur du moyeu.

[MB Spezialabbruch](#) est une entreprise allemande spécialisée dans la démolition et le démontage de structures en béton dans divers domaines, en particulier l'éolien.

Filières de démantèlement et recyclage des éoliennes

Pays-Bas (pales)

Selon cet [article](#) de l'Offshore Wind Innovation Centre (OWIC), le 15 février 2022, dans le port maritime d'Ems (Eemshaven, Groningue, Pays-Bas), un consortium s'est constitué pour mettre en place une filière de démantèlement et recyclage des pales d'éoliennes en boucle fermée — une première mondiale. Ce consortium, appelé Decom North, est composé des entreprises suivantes, qui constituent une [chaîne de valeur](#) complète depuis le démantèlement jusqu'à de nouveaux produits (y compris de nouvelles pales en composites dans le cadre d'un projet de recherche avec l'écosystème de chimie durable [Chemport Europe](#) et l'Offshore Wind Innovation Centre — [OWIC](#)) : [Buss Terminal](#), [Mammoet](#), [Lubbers Transport](#), [DHSS Eemshaven](#), [Bek & Verburg](#), [Nehlsen Metaal Recycling](#), [CRC Industries](#), [SCS Logistics & Shipco Transport](#) et [Nedcam Solutions](#).

Il est prévu de construire une usine pilote près d'Eemshaven pour centraliser le traitement et le recyclage des flux terrestres et maritimes de pales mises au rebut (fonctionnement en « guichet unique »), et leur transformation en granulés, matière première pour de nouveaux produits (revêtements de berges, moules, ponts, tapis de grue, etc.). Avant que cette usine pilote ne soit opérationnelle, les pales seront acheminées vers l'entreprise allemande [Neocomp](#) (Brême) pour traitement et recyclage en cimenteries.

Espagne (pales)

Le 31 mai 2022, les deux entreprises espagnoles Iberdrola (énergéticien) et FCC Àmbito (recycleur) avaient [annoncé](#) le lancement du projet EnergyLOOP dédié au recyclage des pales d'éoliennes, à l'échelle industrielle, dans le cadre du programme [PERSEO](#) Venture Builder d'Iberdrola. Siemens Gamesa — présent dans plus de la moitié des parcs éoliens installés en Espagne — et GDES Wind — forte expérience dans la maintenance des pales d'éoliennes — sont également parties prenantes de ce projet.

Plus récemment (19 janvier 2023), Iberdrola et FCC ont [annoncé](#) la construction d'une première usine à Cortes (Navarre, Espagne), un emplacement stratégique en raison de sa proximité avec les principaux parcs éoliens du pays (gisements), de ses voies communications avec d'autres régions dotées d'importantes installations éoliennes (transport et logistique), ainsi que du soutien (politique, financement) du gouvernement de Navarre et de l'entreprise publique de développement économique Sodena (Sociedad de Desarrollo de Navarra).

Le périmètre du projet comprend toutes les étapes du circuit de recyclage, depuis le prétraitement et le conditionnement des pales sur le site de démantèlement (parc éolien), en passant par la logistique et le transport des déchets, jusqu'aux technologies de recyclage et à la commercialisation des produits recyclés pour différents secteurs (énergie, aérospatiale, automobile, textile, chimie, construction) — le communiqué conjoint ne dit rien sur les technologies de recyclage ni les produits recyclés générés.

Les travaux de construction commenceront à l'automne 2023 et la centrale devrait être opérationnelle en 2024. EnergyLOOP représente un investissement de près de 10 millions d'euros avec, à la clé, une centaine d'emplois directs et indirects au cours de la décennie.

Belgique (éoliennes)

Créée à l'initiative du port d'Ostende (Flandre-Occidentale, Belgique) et de REBO nv, [DecomWind](#) est une plate-forme [lancée](#) le 26 août 2021 et réunissant des partenaires publics et privés qui partagent expériences, connaissances et compétences autour de solutions pour la rénovation, la réutilisation ou le recyclage des éoliennes terrestres et offshore en fin de vie. DecomWind organise des webinaires, [ateliers](#), présentations dédiées et séminaires sur de très nombreux sujets susceptibles d'intéresser les diverses parties prenantes — infrastructures en Flandre et en Wallonie, marchés, cadre juridique, éolien terrestre et offshore, technologies de recyclage actuelles et à venir (en particulier pour les

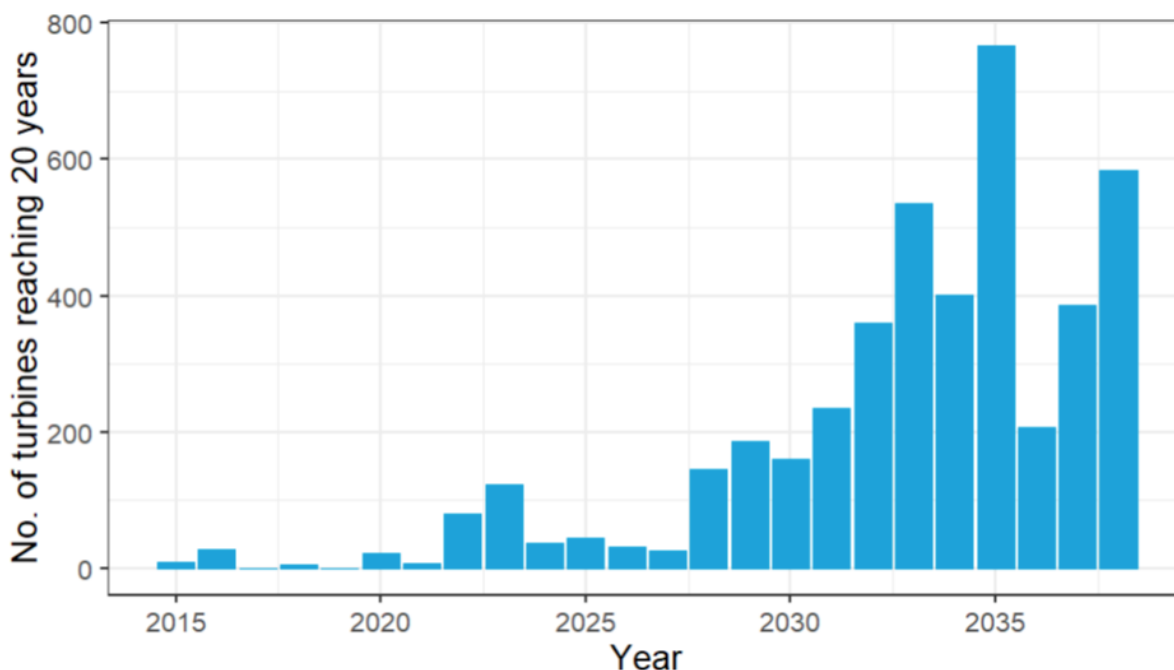
pales), logistiques maritime et portuaire, accessibilité portuaire, décontamination, démantèlement, recyclage en boucle fermée, utilisateurs finaux, déchets, etc.

Mer du Nord (offshore)

Alors que les processus de démantèlement des parcs éoliens terrestres (fin de vie, repowering) sont bien connus, les retours d'expérience sur le démantèlement des parcs éoliens offshore restent peu nombreux. Le programme [Interreg VB North Sea Region](#) (mer du Nord) [DecomTools](#) (2018-2023) vise à combler cette lacune en concevant et en développant des concepts éco-innovants afin de réduire les coûts de démantèlement de 20 % et l'empreinte environnementale (teqCO2) de 25 % et, d'autre part, améliorer les savoir-faire et expertises des parties prenantes régionales (mer du Nord).

DecomTools réunit une quinzaine de partenaires issus de 6 pays (Allemagne, Belgique, Danemark, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni), ainsi que diverses [parties prenantes](#). Les travaux de recherche, réalisés à l'échelle transnationale et en s'appuyant sur des compétences intersectorielles multidisciplinaires, doivent conduire à des pilotes de démonstration et des outils opérationnels dans les domaines de la logistique, de la sécurité, de la conception des navires, du recyclage et de l'upcycling. Un défi majeur posé par le démantèlement des parcs éoliens offshore est l'optimisation des infrastructures offshore et portuaires existantes.

Cette [note](#) datée du 12 janvier 2021, relative au démantèlement des fermes éoliennes offshore, au recyclage, à la réutilisation et la vente de composants ou matériaux, présente l'état d'avancement du programme DecomTools à date. En Europe, le nombre d'éoliennes offshore arrivées en fin de vie est encore modeste mais augmente de manière significative à la fin de la décennie, plusieurs machines atteindront en effet chaque année la durée de vie opérationnelle de 20 ans, nécessitant un démantèlement : une vingtaine en 2020, 80 en 2022 et plus de 120 éoliennes en 2023, un pic étant attendu en 2035 (cf. illustration ci-après).



Nombre d'éoliennes offshore atteignant la durée de vie de 20 ans par an en Europe (source : [DecomTools](#), 2021).

Le projet DecomTools, aujourd'hui terminé, a donné lieu à une [conférence](#) finale en janvier 2023.

1.2.5 - Opérations de démantèlement des éoliennes

Cette partie vise à renseigner diverses questions opérationnelles relatives au démantèlement des divers constituants des éoliennes en fin de vie, en particulier :

- le déferraillage des massifs de fondation, le broyage des bétons, l'élaboration de granulats ;
- la découpe des mâts et le recyclage des métaux ;

- le démantèlement de la nacelle, avec récupération des métaux et le démontage des aérogénérateurs avec récupération des aimants permanents ;
- le démantèlement des pales, le découpage (avec prise en compte des problèmes d'émissions de poussières), puis le stockage des matériaux composites à base de résines thermodurcissables (époxy ou polyester) et renfort de fibres (verre ou carbone).

Cette partie vise également à recenser les divers moyens techniques (infrastructures à bâtir par exemple plateformes, équipements nécessaires par exemple grues), humains (ressources humaines, compétences requises) et financiers (coûts associés) qui sont requis et engagés sur site pour des opérations de démontage et démantèlement, préalablement au recyclage et à la valorisation des différents éléments.

Éoliennes terrestres

Partout en Europe et dans le monde, les opérations de démantèlement et de démontage des éoliennes font appel à des techniques disponibles sur le marché (engins de levage et de grutage, véhicules de transport, etc.), et la plupart des matériaux entrent dans des filières de collecte, de tri, de réemploi ou de réutilisation ainsi que de recyclage, qui sont structurées et identifiées (béton, métaux ferreux et non ferreux, matériels électriques et électroniques, etc.).

Dans ce [document](#) d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres, publié en novembre 2020 (déjà cité plus haut), WindEurope consacre un chapitre entier (chapitre 4) aux opérations de démantèlement des éoliennes terrestres, y regroupant les best practices recensées en Europe — outre le chapitre 3 dédié à un exemple de plan de démantèlement détaillé, préalable nécessaire à la phase opérationnelle, dont il a été question plus haut.

Pour la démolition et le démantèlement de constructions et d'installations infrastructurelles, il existe différentes procédures, machines et équipements parmi lesquels choisir — selon les différentes directives nationales en matière de démolition. En Allemagne, la norme [DIN 18007 Abbruchverfahren](#) (travaux de démolition) relative aux méthodes de démolition fournit des informations sur les termes, les procédures et les domaines d'application pour la démolition des constructions ou infrastructures. L'annexe A de la norme DIN 18007 est utile pour sélectionner les méthodes de démolition appropriées. Dans ce cadre, les procédures les plus courantes sont évaluées par rapport à la norme DIN 18007 en termes d'adéquation et d'impact en fonction de la construction, du composant et du matériau de construction.

Pour les éoliennes, la fondation, l'infrastructure et les autres équipements BoP (Balance of Plant), les critères d'évaluation utilisés pour définir la procédure de démantèlement sont répertoriés ci-après :

- hauteur du moyeu de l'éolienne ;
- type de mât (béton, acier tubulaire, hybride, en treillis, etc.) ;
- type de fondation (plate standard, sur pieux, etc.) ;
- accessibilité et environnement de la turbine (espace ouvert, forêt, montagne, etc.) ;
- disponibilité d'espaces de stockage, d'équipements de chantier ;
- emplacement et cheminement des câbles ;
- calendrier des travaux.

La procédure de démantèlement à appliquer doit également prendre en compte les aspects suivants :

- impacts environnementaux ;
- endommagement des sols ;
- considérations de sécurité ;
- pollutions diverses (bruits, poussières, vibrations, etc.) ;
- analyse coût-bénéfice.

Les opérations concrètes de démantèlement, effectuées en fonction de la procédure de démantèlement retenue et dans le cadre du plan de démantèlement, suivent la séquence d'étapes suivante :

- 1° rotor (pales et moyeu) ;

- 2° nacelle ;
- 3° mât ;
- 4° fondations ;
- 5° zone d'assemblage des engins de levage (grue) et voies d'accès.

Le démantèlement des autres composants de l'infrastructure et autres équipements BoP (Balance of Plant) est réalisé en parallèle ou après le démantèlement des étapes 1° à 5°.

Mise en place du chantier

Préalablement à l'installation du chantier, il convient de s'assurer que les mesures de préparation de la zone de montage de la grue et des voies d'accès, y compris les rayons de courbure, ont été mises en œuvre et que la zone répond aux exigences de l'entreprise de levage (grue).

En outre, il appartient à l'entreprise de démantèlement de créer des conditions de travail sûres et saines sur le chantier avec les équipements du chantier.

Concernant les matériels de chantier, le site de démantèlement est sécurisé conformément au plan d'installation du site convenu (clôture de chantier, signalisation). L'alimentation en eau et l'évacuation des eaux usées, ainsi que l'alimentation électrique sont préalablement installées. Idem pour les bureaux, salles de repos, équipements sanitaires et installations de premiers soins. Un équipement d'extinction d'incendie doit être fourni pour certains travaux — par exemple, oxycoupage (découpe au chalumeau). Des zones de circulation, y compris des voies d'évacuation et de secours, sont prévues, tout comme les restrictions de circulation sur certaines voies publiques, conformément aux codes routiers — exemple Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) en Allemagne. Des espaces correctement dimensionnés doivent être prévus pour la dépose, la manutention, le démontage, le fractionnement et le stockage intermédiaire des composants des éoliennes, ainsi que pour la collecte et le tri des flux de déchets et de matériaux. Enfin, préalablement à l'installation d'équipements lourds (grue principale, grues auxiliaires, conteneurs à déchets, etc.), il convient de s'assurer que l'ensemble sol et sous-sol soit suffisamment solide.

Démantèlement de l'éolienne (hors fondations)

Le démantèlement de l'éolienne débute toujours avec la dépose du rotor et on distingue deux cas de figure, selon que l'éolienne aura une seconde vie (réemploi en totalité) ou qu'elle est vouée à la destruction (recyclage et élimination). Les premières étapes sont communes aux deux voies :

- orientation de la turbine pour pouvoir manœuvrer la grue ;
- inclinaison des pales selon une position adaptée au démontage et à la mise au sol du rotor ;
- déconnexions successives des câblage d'alimentation et de communication ;
- le cas échéant, mise hors tension des dispositifs de stockage d'énergie ;
- montage de la grue principale sur la zone dédiée ;
- démontage et descente du rotor dans son ensemble en une seule opération ;
- dépose à plat du rotor sur le sol ;
- démontage du rotor et de ses composantes (3 pales individuelles, 1 moyeu).

Pour le rotor, les étapes suivantes sont distinctes en fonction de la destinée de l'éolienne :

- réemploi en totalité :
 - o chargement direct des pales du rotor sur des transporteurs lourds avec supports de transport appropriés,
 - o transport des pales du rotor jusqu'à la destination convenue avec l'acheteur de l'éolienne,
 - o chargement direct du moyeu sur des transporteurs lourds avec châssis de transport adapté,
 - o transport du hub vers la destination convenue avec l'acheteur de l'éolienne ;
- recyclage et élimination :
 - o stockage latéral temporaire des pales individuelles et du moyeu,
 - o découpe des pales en pièces transportables,
 - o chargement des tronçons de pales sur des véhicules standards ;

- transport des tronçons de pales à l'entreprise spécialisée dans la gestion et le traitement des déchets composites ;
- chargement du moyeu sur des transporteurs lourds ;
- transport du hub vers la société spécialisée dans la gestion de ce type de déchets.

Après le démantèlement du rotor, c'est au tour de la nacelle, en distinguant là encore deux cas de figure : alors que le démontage complet et la descente de la nacelle en une seule opération, ainsi que le chargement direct de la nacelle sur des transporteurs lourds avec châssis de transport adapté sont deux étapes communes aux deux voies, le transport de la nacelle se fait jusqu'à la destination convenue avec l'acheteur de l'éolienne (réemploi en totalité) ou vers la société spécialisée dans la gestion des déchets (recyclage et élimination).

Après la nacelle, le mât, généralement en acier tubulaire. Dans les deux cas de figure, le démantèlement du mât s'effectue par le démontage successif de ses différents segments après avoir desserré les connexions (brides) et abaissé chaque élément en une seule opération. Puis, en fonction du devenir de l'éolienne, on aura :

- réemploi en totalité :
 - chargement direct des différentes sections sur des transporteurs lourds avec châssis de transport approprié,
 - transport des différents éléments jusqu'à la destination convenue avec l'acheteur de l'éolienne,
 - démantèlement des composants de l'éolienne qui peuvent encore se trouver dans la base du mât,
 - chargement direct de ces composants restants sur des fourgons avec châssis de transport adapté,
 - transport de ces composants restants jusqu'à la destination convenue avec l'acheteur de l'éolienne ;
- recyclage et élimination :
 - stockage temporaire des différentes sections de la tour sur une aire de stockage prévue à cet effet,
 - découpage (chalumeau) des différentes sections du mât sur site en morceaux transportables,
 - chargement des pièces dans des conteneurs puis transport vers l'entreprise spécialisée dans la gestion de ce type de déchets,
 - démantèlement des composants de l'éolienne qui peuvent encore se trouver dans la base du mât (idem supra),
 - chargement direct de ces composants restants sur des fourgons avec châssis de transport adapté (idem supra),
 - transport de ces composants restants vers l'entreprise spécialisée dans la gestion des déchets.

S'agissant du devenir de l'éolienne, un troisième cas de figure est à considérer : celui de l'élimination de l'éolienne mais avec réemploi de composants individuels (pales, boîte de vitesses, génératrice, etc.). Dans ce cas, il convient d'adapter la procédure en combinant de manière appropriée (ordonnancement) les étapes indiquées ci-avant.

Démantèlement de la fondation

Après le démantèlement complet de l'éolienne (i. e. génératrice hors fondation), la fondation est démantelée. L'excavation est totale ou partielle, selon les pays et selon le type de fondation, car on distingue fondation plate standard et fondation sur pieux (pieux battus, pieux moulés), préalablement insérés dans le sol. Les pieux ne sont jamais retirés, leur retrait conduirait à une perturbation importante de la structure du sol. WindEurope recommande le démantèlement complet des fondations (hors pieux) en vue d'un usage ultérieur sans restriction de la zone.

Le démantèlement proprement dit d'une fondation se fait au moyen d'une excavatrice muni d'un brise-roche hydraulique, ou par dynamitage — en particulier pour des profondeurs de fondation supérieures

à deux mètres. Les fragments de bétons ainsi générés sont ensuite collectés et convoyés — sur site, le cas échéant — vers un équipement dédié à la production de granulats. Il existe des centres de recyclage fixes, ainsi que des installations mobiles de concassage et de tri pour les déchets de démolition et de construction. Pour une illustration des opérations de démantèlement des fondations en béton (et aussi des mâts en béton), voir par exemple cette [présentation](#) de Ralf Voßhenrich, directeur général de l'entreprise allemande Hagedorn, faite lors d'un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire), organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), le 21 mai 2019 à Paris.

Les vibrations produites par l'action du brise-roche, conjuguées avec l'usage d'électro-aimants, permettent généralement de bien séparer les fragments de béton et les ferrailles (armatures). En cas de dynamitage, l'excavation peut être complétée par l'emploi d'un brise-roche et d'un électro-aimant. Ferrailles et bétons sont triés et transportés séparément vers des usines dédiées pour leur récupération et leur recyclage ultérieur.

Démantèlement des autres équipements et éléments d'infrastructure

À ce titre, il convient en particulier de noter, outre les équipements ou éléments propres au fonctionnement de l'éolienne (transformateur, station de transfert, câbles, raccordement au réseau, etc.), le démantèlement de la zone d'assemblage des grues et les voies d'accès à l'éolienne (retrait et criblage des ballasts, retrait des géotextiles et des géogrilles, etc.).

Découpage des pales

Quel que soit l'outil utilisé, le tronçonnage au moyen d'un procédé mécanique associé à un engin de chantier (excavatrice) est toujours préféré à un procédé manuel (outils portatifs). WindEurope recommande de réaliser les opérations de découpage en zone confinée pour minimiser les émissions de poussières mais, dans la pratique, tous les travaux paraissent réalisés à l'air libre — visionnage de vidéos.

On distingue quatre méthodes de découpe des pales :

- découpage au jet d'eau :
 - o principe : cette méthode utilise un jet d'eau à très haute pression, ou un mélange d'eau et d'une substance abrasive,
 - o avantages et inconvénients : cette technique, qui peut traiter tous les différents matériaux des pales, y compris les métaux, est assez respectueuse de l'environnement en ce qui concerne les émissions de poussières et de bruits, mais la consommation d'eau est élevée par rapport aux autres procédés ;
- scie à fil :
 - o principe : cette méthode utilise un fil d'acier diamanté refroidi à l'eau, enroulé autour de la pale de l'éolienne,
 - o avantages et inconvénients : la scie à fil, qui peut couper tous matériaux (y compris les métaux) de pales de toutes dimensions (le fil est sans limite de taille) de manière nette et précise, est une méthode respectueuse de l'environnement au regard des émissions de poussières et de bruit, ainsi que pour ce qui concerne la gestion de effluents (recyclage de l'eau de refroidissement, récupération des déchets de coupe), mais le procédé est lent et la pale doit être solidement fixée pour éviter de pincer le fil lors de la coupe ;
- scie circulaire :
 - o principe : cette méthode utilise des disques diamantés de différents types et tailles, de la scie portative à la scie à entraînement hydraulique avec des tailles de lame allant jusqu'à 2 mètres de diamètre,
 - o avantages et inconvénients : la scie peut sectionner nettement et précisément des pales de toutes tailles mais généralement en plusieurs coupes, augmentant le bruit et la quantité de déchets de coupe et de poussières, ces dernières pouvant être traitées par un système de dépoussiérage approprié (aspiration, brumisation) — le principal avantage est qu'il est possible d'effectuer des coupes indépendantes dans toutes les directions, rendant possible l'extraction sélective de matériaux le cas échéant ;
- pince à mâchoires :

- principe : cette méthode — la plus couramment employée — utilise des mâchoires hydrauliques pour sectionner les pales,
- avantages et inconvénients : cet équipement de démolition, simple à mettre en œuvre, effectue une coupe très grossière à travers le matériau qui est broyé dans la zone de coupe, de sorte qu'il est difficile de contrôler les émissions de poussière et de fibres (brumisation nécessaire mais pas toujours utilisée, nettoyage de la zone après travaux) — les fragments de pales sont également susceptibles d'émettre de la poussière et des fibres pendant le transport par camions, ce qui demande des mesures appropriées (arrimage, couverture et emballage des pales).

Gestion des matériaux et déchets et remise en état du site

À titre indicatif, le sujet de la gestion et du devenir des déchets de construction et de démolition (béton et ferrailles) est traité dans ce [document](#) (déjà cité plus haut) de novembre 2020 de WindEurope (pages 39 et 40), qui indique que les technologies de séparation et de valorisation de ces déchets sont bien établies, accessibles et économiquement abordables.

Le sujet de la gestion et du devenir des métaux (fer/acier/fonte, cuivre, aluminium) est succinctement traité dans ce même [document](#) (pages 40 et 41) et celui des matériaux composites aux pages 41 à 43 du même rapport. Les fibres et polymères entrant dans la composition des pales représentent en poids l'essentiel de la composition des matériaux composites, soit 60-70 % de fibres pour 30-40 % de résine.

En outre, la question de la gestion des terres rares, présentes principalement dans la composition des génératrices à aimants permanents, est traitée aux pages 44 et 45 du rapport de WindEurope — turbines à entraînement direct. Peu est dit sur le démontage et la récupération des aimants permanents, si ce n'est que le démantèlement et la séparation réalisés manuellement sont coûteux et à forte intensité de main-d'œuvre, apparaissant actuellement non rentables à grande échelle. Pour WindEurope, une alternative est la récupération mécanique sur ligne robotisée de démontage et de séparation des constituants de la génératrice, une option nécessitant des investissements appropriés et un marché pour les aimants récupérés.

Enfin, la gestion des fluides, lubrifiants et autres matériaux est traité à la page 45 du rapport de WindEurope.

Le chapitre 5 du document de WindEurope conclut par des recommandations en matière de traçabilité des matériaux — en l'occurrence terres rares et composites, aux fins d'optimiser leur recyclage et de favoriser la circularité (pages 45 et 46), ainsi que des considérations de portée générale en matière de santé et de sécurité (page 46).

Le chapitre 6 du document de WindEurope est consacré aux opérations de remise en état du site (pages 47 et 48).

Zoom sur la norme DIN SPEC 4866 (retour de RDRWind e.V.)

En Allemagne, au tournant de l'année 2020/2021, plus de 5 200 éoliennes ont atteint la fin de leur soutien tarifaire de rachat de 20 ans en vertu de la loi sur les énergies renouvelables (EEG — Erneuerbare Energien Gesetz, promulguée en avril 2000 et selon laquelle un tarif d'achat dédié est créé), et 8 000 autres éoliennes devraient suivre d'ici la fin 2025. Certaines de ces éoliennes ont déjà été remplacées dans le cadre d'un repowering, d'autres continueront à fonctionner au-delà de la fin de leur période de soutien.

Pour pallier l'absence de norme en matière de démantèlement et de recyclage des éoliennes, l'Institut allemand de normalisation (DIN — Deutsches Institut für Normung) a publié, le 17 juillet 2020, la norme [DIN SPEC 4866](#) dédiée au démantèlement, au démontage, au recyclage et à la récupération durables des éoliennes. Ce document de 26 pages, rédigé par un consortium de 25 experts de l'industrie de l'énergie éolienne et du recyclage, des scientifiques et des représentants des autorités administratives (Agence fédérale de l'environnement — UBA, Umweltbundesamt), fixe les conditions-cadres pour l'ensemble du processus de démantèlement, de la planification à la documentation en passant par le démantèlement proprement dit, et fournit notamment une première assistance aux exploitants.

L'association industrielle pour le repowering, le démantèlement et le recyclage des éoliennes [RDRWind e.V.](#) (déjà citée plus haut) est à l'origine de la nouvelle norme DIN SPEC 4866. RDRWind e.V. a été fondée à Hanovre (Basse-Saxe) fin 2018 dans le but d'établir les premières normes industrielles relatives aux meilleures pratiques en matière de démantèlement.

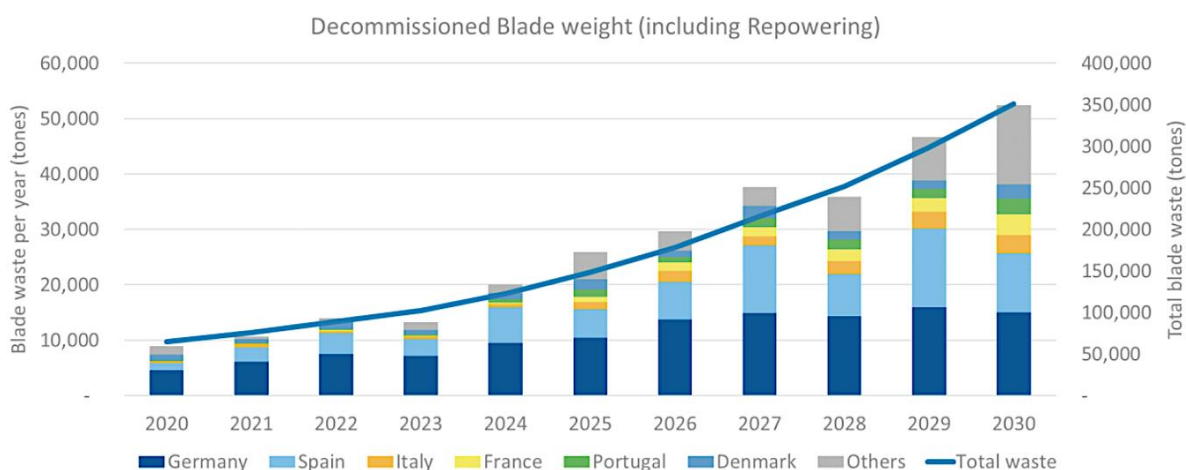
En Allemagne toujours, une illustration des opérations et procédures de démantèlement des éoliennes terrestres — et coûts associés — est disponible dans cette [présentation](#) de Jens Monsees,

responsable Repowering & Service au sein de l'entreprise [Wörmann-Team GmbH & Co. KG](#), faite lors d'une [conférence](#) sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie en France et en Allemagne, organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)) le 12 mars 2020 à Berlin (dispositifs réglementaires en vigueur, retours d'expérience, aspects économiques, conception, etc. — voir le [programme](#) de cette conférence),

Zoom sur les déchets de pales en matériaux composites

À propos des gisements de pales en fin de vie en Europe, il a déjà été mentionné plus haut l'[appel](#) lancé mi-juin 2021 par WindEurope aux dirigeants des pays de l'Union européenne en vue d'interdire l'enfouissement des pales en 2025.

Selon ce [position paper](#) (novembre 2020) de WindEurope relatif à la construction d'une économie circulaire pour le recyclage des pales d'éoliennes, à fin 2020, environ 4 GW de capacités avaient été démantelées en Europe, représentant près de 50 000 tonnes de déchets composites — pour près de 4 700 éoliennes, soit 14 000 pales. Au cours des prochaines années, le nombre annuel de turbines mises hors service dépendra largement des politiques et des incitations mises en œuvre ainsi que du prix de gros de l'électricité (cf. démanteler ou prolonger). Alors que certaines turbines peuvent être déclassées après seulement 15 ans, WindEurope affirme que la majeure partie des turbines seront déclassées entre 20 et 30 années après leur mise en service. D'ici 2030, l'industrie éolienne terrestre aura mis hors service près de 300 000 tonnes de pales (cumul à 2030) et il ne s'agit que d'une fraction du total des déchets composites : selon l'[EuCIA](#), l'éolien pèse pour environ 10 % du total des déchets composites thermodurcissables mais pour moins de 5 % du total des déchets composites combinant thermodurcissables et thermoplastiques. Selon l'[université de Strathclyde](#) à Glasgow (Écosse), à l'échelle mondiale, les déchets de pales d'éoliennes totaliseront environ 400 000 tonnes par an en 2030 et près de 2 millions de tonnes en 2050. La plupart des turbines seront principalement mises hors service en Allemagne et en Espagne, un peu au Danemark. Vers la fin de la décennie, l'Italie, la France et le Portugal mettront également hors service un grand nombre d'éoliennes vieillissantes (cf. illustration ci-après). Les volumes de pales mises hors service en Europe ainsi présentés se fondent sur l'hypothèse selon laquelle les taux de démantèlement après 20 ans, 25 ans ou 30 ans suivant la mise en service sont respectivement de 20 %, 40 % et 100 %. Pour mémoire, les taux de démantèlement présentés dans la 1^{re} partie (situation en France) après 15 ans, 20 ans ou 25 ans après la mise en service sont, respectivement, de 30 %, 80 % et 100 % — d'après le Ser : cette différence indique que la fin de vie des éoliennes intervient plus tard pour WindEurope.



Volumes (tonnes) de déchets de pales d'éoliennes démantelées en Europe, incluant le repowering (source : [WindEurope](#), 2020).

À l'échelle internationale, cet [article](#) de 2017 a réalisé une estimation, au niveau mondial (Europe, États-Unis, Chine...), des volumes de déchets de pales d'éoliennes jusqu'en 2050.

Toujours à l'échelle internationale, il convient de mentionner les travaux menés par les experts de l'IEA Wind TCP sur le recyclage des pales en fin de vie. Le programme de collaboration sur les technologies éoliennes de l'Agence internationale de l'énergie ([IEA Wind TCP](#) — International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme) est une coopération internationale de 23 pays et membres sponsors qui partagent informations et travaux collaboratifs de recherche pour faire progresser le déploiement de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale. Au sein de ce programme, la

tâche 45 ([IEA Wind TCP Task 45](#) : Recycling wind turbine blades), [lancée](#) en mai 2021, est consacrée spécifiquement au recyclage des pales éoliennes.

Pour faire face aux problèmes et défis liés au recyclage des pales (verrous technologiques, disparités législatives, manque d'informations sur les matériaux à recycler, cycle de vie et chaîne de valeur, etc.), cette tâche rassemble les principales parties prenantes afin d'identifier les obstacles et les stratégies pour la mise en œuvre de solutions de recyclage des pales d'éoliennes à grande échelle.

La tâche 45 comprend trois modules de travail thématiques ([Work Package](#)), à savoir les lots WP2 (technologies), WP3 (cycle de vie et chaîne de valeur des pales) et WP4 (normalisation, certification et législation). Pour l'heure, la tâche 45 n'a publié (décembre 2022) que cette [note](#) préliminaire relative aux politiques, législations, directives et diverses initiatives traitant de la fin de vie des pales d'éoliennes.

Les contacts opérationnel de la tâche 45 sont [Justine Beauson](#), ingénieure de développement à l'université technique du Danemark DTU (Danmarks Tekniske Universitet), [DTU Wind](#) (Department of Wind and Energy Systems), et [Derek Berry](#), ingénieur principal au Laboratoire national sur les énergies renouvelables NREL (National Renewable Energy Laboratory) des États-Unis, [Wind Energy Technologies](#), et directeur de la technologie des éoliennes au sein de l'institut [IACMI](#) (Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation). Il sera de nouveau question de l'IEA Wind Task 45 plus loin, à l'étape 2 de la présente étude RECORD.

À propos contrôle des émissions de poussières générées par le démantèlement des pales, il convient de noter cette société danoise [Isodan Engineering](#), localisée à Holeby dans la commune de Lolland (région Sjælland, au Danemark). Isodan Engineering est un fournisseur de solutions Green Tech pour le recyclage et l'upcycling. L'entreprise conçoit et produit notamment des installations de production mobiles et conteneurisées, non génératrices de poussières, pour le recyclage sur site de déchets de pales d'éoliennes, dans des formats aisément transportables.

Le système est conçu selon un processus en deux étapes, exécuté par un seul opérateur. De gros morceaux de pales d'éoliennes sont d'abord introduits à une extrémité, dans un espace de prédéchiquetage où ils subissent une réduction de taille. Les produits de ce premier traitement sont ensuite acheminés par convoyeur vers une autre partie de la machine pour un deuxième traitement (déchiquetage, broyage) visant à générer des matériaux de dimensions spécifiées — en fonction des usages ultérieurs. L'ensemble du dispositif fonctionne sous pression négative pour éliminer la poussière en suspension dans l'air. Au terme du processus, les sacs contenant les matériaux déchiquetés sont récupérés pour être réutilisés dans de nouvelles applications.

L'équipement est dimensionné pour être intégré directement dans des conteneurs d'expédition de 20 ou 40 pieds, pour être facilement transportés par camion, train ou bateau. Ils peuvent être installés comme machines fixes dans une installation de recyclage ou utilisés en tant qu'installation mobile avec un groupe électrogène séparé. À titre indicatif, une unité de 20 pieds est à même de traiter entre 500 et 1 500 kg de matériau par heure.

La première machine d'Isodan Engineering a été développée en 2018 pour la société de recyclage [Global Fiberglass Solutions](#) (GFS) située à Bothell (Washington, États-Unis), qui conçoit et fabrique des matériaux de la gamme EcoPoly (granulés, panneaux) pour les applications de construction (cf. illustrations ci-après).



La solution mobile d'Isodan Engineering (source : Isodan Engineering).

Enfin, dans sa réponse faite conjointement avec l'association flamande de l'énergie éolienne VWEA (déjà citée plus haut), l'entreprise néerlandaise Business in Wind (également déjà citée plus haut) indique ne pas découper ni stocker les pales démantelées sur site, mais les transporter en une seule pièce vers des entreprises spécialisées pour le réemploi (Blade Made, déjà citée plus haut) ou le recyclage ([CRC](#), [Jansen Recycling Group](#)).

Éoliennes offshores

Selon cet [article](#), Le premier démantèlement au monde d'un parc éolien offshore date de 2015-2016 : entre novembre 2015 et janvier 2016, l'entreprise Vattenfall a ainsi démantelé cinq éoliennes, d'une capacité totale de 10 MW (2 MW par unité), sur le parc éolien d'Yttre Stengrund dans le détroit de Kalmar (Kalmarsund, Småland, Suède), laissant une partie des fondations (béton) dans le sol marin. Une [vidéo](#) accélérée du processus de démantèlement illustre le déroulement de ce chantier.

À propos des modalités de démantèlement d'un parc éolien offshore flottant, la [fiche thématique 17](#) (juillet 2021, déjà citée plus haut) du dossier du maître d'ouvrage (DMO) relatif aux projets d'éolien offshore flottant en Méditerranée ([A06](#)) examine cette question. Cette fiche rapporte un retour

d'expérience européen sur le démantèlement et le recyclage en 2016 de la première éolienne flottante jamais démantelée : un prototype de 2 MW installé sur un flotteur semi-submersible conçu par l'entreprise américaine [Principle Power](#), en 2011 sur le site d'Agucadoura (Portugal), à 5 km des côtes. Les opérations de démantèlement (flotteur, turbine) ont démontré l'un des avantages de l'éolien flottant sur l'éolien posé : l'absence — comme lors des phases d'installations — de moyens nautiques lourds et coûteux. Le flotteur a été déconnecté de ses lignes d'ancrage (avec récupération des ancrés) et remorqué jusqu'à un port où l'éolienne a été retirée de la plateforme flottante via une grue.

Dans cette [publication](#) d'avril 2021, l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#)) — le principal centre d'innovation technologique du Royaume-Uni pour l'énergie éolienne, houlomotrice et marémotrice offshore — présente une analyse coûts-bénéfices selon les cinq scénarios de fin de vie tels qu'indiqués ci-après, pour un parc éolien offshore britannique représentatif composé de 35 éoliennes atteignant 25 ans en 2040 :

- démantèlement complet ;
- démantèlement partiel ;
- repowering complet ;
- repowering partiel ;
- prolongation de la durée de vie.

Les résultats montrent qu'un repowering partiel produit les flux de trésorerie positifs les plus élevés, suivi d'une prolongation de la durée de vie (2^e option la plus rentable) et d'un renouvellement complet (remplacement des fondations et des câbles). De plus, chaque scénario nécessitant un ensemble de navires pour mettre en œuvre chaque stratégie, l'empreinte carbone des navires mobilisés dans la réalisation de chaque scénario a été estimée et a montré que le repowering complet avait les émissions d'équivalent carbone les plus élevées (en l'occurrence 2 707 tCO_{2e} par an) et la prolongation de la durée de vie la plus faible (63 tCO_{2e} par an). Cependant, ces émissions de carbone sont considérées comme mineures par rapport au carbone économisé grâce à l'exploitation du parc éolien. L'étude indique que les coûts associés à l'utilisation des navires représentent 60 % à 80 % des coûts de démantèlement.

Dans cet [article](#) paru le 26 novembre 2020 sur le portail Strom-Forschung, Silke Eckardt, professeure à l'université des sciences appliquées de Brême (Allemagne), présente le projet (complexe) de recherche [SeeOff](#) (Strategieentwicklung zum effizienten Rückbau von Offshore-Windparks) relatif au développement d'une stratégie pour le démantèlement efficace des parcs éoliens offshore (exigences légales, modalités de démantèlement et de logistique, en passant par les installations de recyclage nécessaires au port).

Ce [projet](#) s'attaque notamment aux défis spécifiques que pose le démantèlement des parcs éoliens offshore par rapport aux opérations de démantèlement des installations terrestres : travail en haute mer (mer du Nord, mer Baltique), logistique maritime et portuaire, etc.

En matière légale (lois) et juridique (droit national et international), ce projet prend en compte les problèmes de gestion des déchets, les exigences environnementales, les questions de santé et de sécurité du travail en haute mer, ou encore les réglementations douanières ou fiscales.

Partant de ce constat, les experts de SeeOff ont élaboré un cahier des charges et défini différents scénarios de démantèlement, dans le but d'apporter des réponses concrètes (types de navires pour les travaux de démantèlement en mer et pour le transport vers les ports, suppression ou non des câbles présents sur le fond marin à l'intérieur du parc éolien, suppression totale ou partielle des fondations sous le fond marin, etc.).

Le projet, réalisé sur la période allant du 1^{er} novembre 2018 au 31 octobre 2021 (avril 2022 dans les faits), a donné lieu à la publication, en mai 2022, à ce [manuel](#) (en allemand — en anglais [ici](#)) pour le démantèlement des parcs éoliens offshore, abordant les différents aspects traités dans le programme de recherche (conditions générales, technologies, logistique, processus, scénarios, durabilité). Les principaux résultats de ce projet ont également été présentés le 30 mars 2022 lors d'un [séminaire](#) de restitution. À consulter également cette [publication](#) parue en novembre 2020.

Par ailleurs, le projet Interreg North Sea Region [DecomTools](#) (déjà cité plus haut) a donné lieu à la publication — notamment — de plusieurs rapports produits pendant la période du projet (2018-2023), en particulier cette [approche opérationnelle](#) du démantèlement des parcs éoliens offshore, publiée le 10 février 2020 — d'autres rapports, disponibles dans cette [liste](#), abordent les aspects opérationnels, économiques ou encore environnementaux du démantèlement des parcs éoliens en mer.

Enfin, ces deux articles, publiés respectivement en [2017](#) (également disponible [ici](#)) et [2019](#) par l'université de Strathclyde à Glasgow (Écosse), abordent également les aspects réglementaires, économiques, opérationnels, logistiques, environnementaux, etc. du démantèlement des parcs éoliens offshore. Un autre [article](#) de 2019 (également disponible [ici](#)) de la même équipe porte plus spécifiquement sur le recyclage des parcs éoliens offshore en phase de démantèlement.

Des retours sont attendus de la part des organisations sollicitées dans les différents pays européens (échelle des pays — WindEurope a répondu sur ce point quoique très sommairement, renvoyant à ce [document](#)), telles que mentionnées ci-avant à la section Devenir des éoliennes en fin de vie.

Le sujet des opérations de démantèlement des éoliennes est peu abordé dans ce [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. 1^{re} partie, Situation en France) pour trois pays européens :

- aux Pays-Bas : annexe 6, pages 68 à 77 ;
- au Danemark : annexe 7, pages 78 à 80 ;
- en Allemagne : annexe 8, pages 81 à 88.

1.2.6 - Tri, transport et logistique post-démantèlement

Cette partie vise à préciser les techniques de tri et de séparation des flux, ainsi que les opérations de transport et logistique appliquées aux différents composants générés.

Tri et séparation des flux

Cette thématique est traitée de manière transversale dans les différentes parties précédentes — notamment celle consacrée aux opérations de démantèlement (cf. supra, section Opérations de démantèlement des éoliennes).

Transport et logistique

Le chargement et le transport des composants d'éoliennes sont sous-traités à des entreprises spécialisées — par exemple : grutiers, transporteurs, etc., qui disposent de savoir-faire spécifiques et d'équipements appropriés. Ces acteurs sont consultés au cas par cas avant chaque opération pour préciser les attentes et exigences — par exemple, non exhaustivement : type et capacité des équipements, gestion des itinéraires, gestion des engins de levage mécanique, plans de levage, besoins en permis, etc. Les fabricants d'éoliennes fournissent généralement toutes les données utiles à la bonne marche des opérations — poids et dimensions des composants, spécifications et dessins détaillant le centre de gravité et les points de levage.

Une demande de chargement est soumise aux autorités administratives locales avant l'opération prévue pour l'autorisation d'effectuer le transport — une procédure accomplie après consultation du prestataire de logistique et de transport retenu pour renseigner la demande de permis. Les prestataires et sous-traitants de transport et logistique sont sélectionnés dans un délai suffisant pour pouvoir effectuer la planification des itinéraires, l'évaluation des risques, le plan de gestion des transports, l'impact de l'opération sur la sécurité et la pratiques des autres usagers de la route et des parties prenantes, l'étude des diverses options et des itinéraires alternatifs, etc.

Une planification détaillée et une évaluation des risques sont effectuées par l'entreprise de levage et manutention (grue) et les entreprises de logistique, en collaboration avec le fabricant d'éoliennes, et ce afin de déterminer la méthode la plus sûre pour soulever et charger les composants pendant le transport. Les résultats de cette planification et de cette évaluation sont documentés dans un plan de levage fournissant des dessins détaillés des configurations de grue et des étapes nécessaires pour soulever, charger et sécuriser les composants.

Le cas échéant, les autorités peuvent imposer la présence de véhicules d'escorte spécifiques (véhicule de police, entreprise privée) pour le transport routier de charges inhabituelles (poids,

dimensions). En outre, au sein d'un convoi, la position de déplacement de chaque véhicule est généralement spécifiée, ainsi que celle des véhicules d'escorte — le cas échéant.

En matière de gestion des risques liés au transport et de sécurité routière, dans l'Union européenne, les dimensions maximales autorisées en trafic national et international et les poids maximaux autorisés en trafic international sont soumis aux dispositions de la [directive 96/53/CE](#) du Conseil et des législations nationales adoptées suite à la transposition de cette directive.

En matière de ressources humaines, seuls les personnels formés, certifiés et compétents (maniement et entretien/maintenance des divers engins et véhicules, sécurité, hygiène, santé) peuvent être déployés pendant les phases de chargement, déchargement, entreposage et transport.

Des retours sont attendus de la part des organisations sollicitées dans les différents pays européens (échelle des pays — WindEurope a répondu sur ce point quoique très sommairement, renvoyant à ce [document](#)), telles que mentionnées ci-avant à la section Devenir des éoliennes en fin de vie.

Le sujet du tri, du transport et de la logistique post-démantèlement est peu abordé dans ce [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. 1^{re} partie, Situation en France) pour trois pays européens :

- aux Pays-Bas : annexe 6, pages 68 à 77 ;
- au Danemark : annexe 7, pages 78 à 80 ;
- en Allemagne : annexe 8, pages 81 à 88.

1.2.7 - Technologies et procédés de recyclage et valorisation

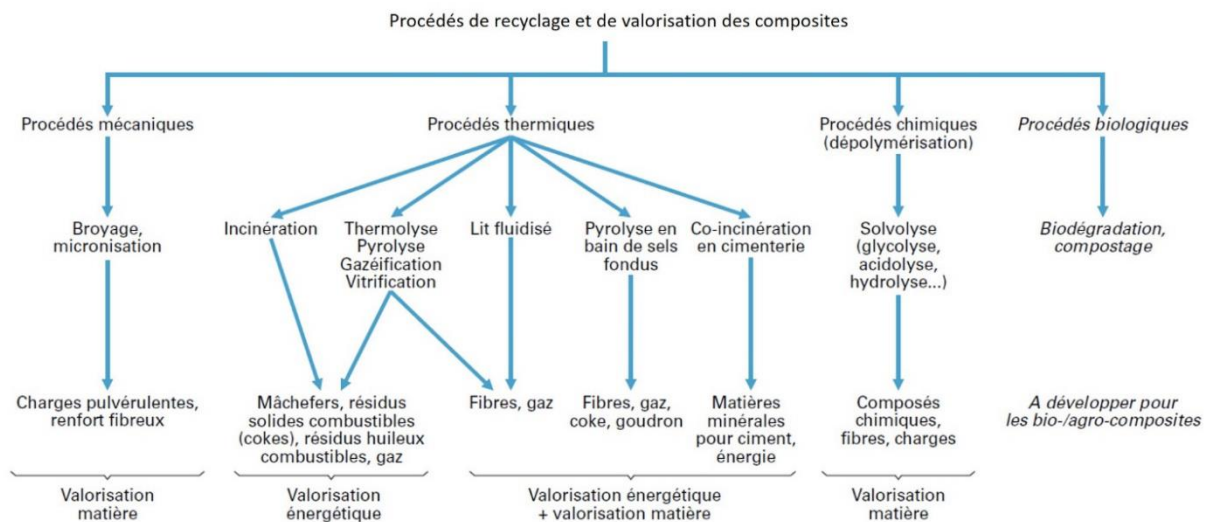
Cette partie vise à décrire les procédés et technologies utilisés actuellement en recyclage et valorisation des différents composants d'éoliennes en fin de vie, en particulier :

- le recyclage mécanique voire chimique par broyage puis traitement des pales en polymère thermodurcissable, à la qualité et au devenir du recyclat obtenu ;
- la valorisation énergétique en tant que combustibles solides de récupération (CSR) ;
- les retours d'expériences (échelles pilote et industrielle).

Cette partie vise également à qualifier les technologies et procédés de recyclage et valorisation ainsi identifiés, en indiquant le niveau de développement (maturité technologique), les unités déployées (industrialisation) et retours d'expériences disponibles, les coûts d'équipement et de fonctionnement associés, ainsi que les impacts environnementaux et sanitaires des technologies et procédés employés.

Un état des lieux des techniques de valorisation des composites mises en œuvre en France et en Europe a été présenté en 1^{re} partie de l'étape 1 (cf. section Technologies et procédés de recyclage et valorisation), à savoir le broyage mécanique fin (valorisation matière) et la méthode de coprocessing (valorisation mixte matière et énergétique) mise en œuvre dans les cimenteries. Un tableau tiré de ce [guide](#) (déjà cité plus haut) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec) publié par l'Ademe en mai 2022 y présente une synthèse des principales solutions techniques disponibles sur le marché pour le traitement, le recyclage et la valorisation des matériaux composites — par opposition aux innovations, pour lesquelles des développements ont été identifiés à une échelle laboratoire ou préindustrielle. Les solutions techniques sont présentées dans le guide technique de l'Ademe en suivant la hiérarchie de gestion des déchets — réemploi, réutilisation et stockage (mise en décharge) ne sont pas repris ici.

Le guide Grec présente un panorama des voies et procédés de recyclage et de valorisation des composites, reproduit ci-après : les procédés mécaniques, thermiques et chimiques sont les plus avancés en termes de maturité technologique. Le choix de la méthodologie de recyclage dépend de la nature des différents constituants du matériau (matrice thermoplastique ou thermodurcissable, renforts à base de fibres de verre ou de carbone) ou de l'application visée pour l'utilisation du recyclat.



Procédés de recyclage et de valorisation des matériaux composites (source : [Ademe](#), 2022).

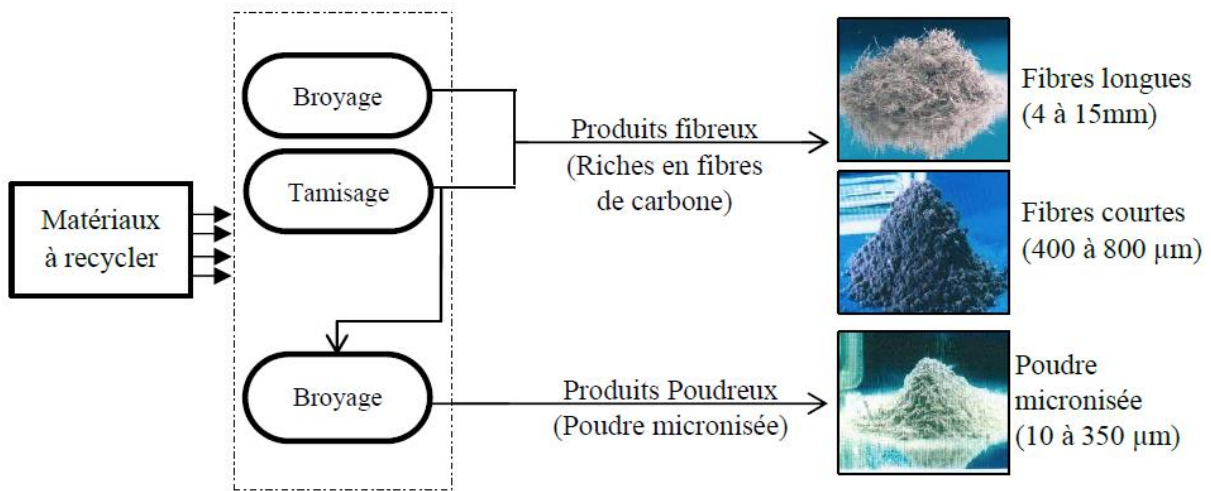
Pour une revue des technologies et procédés de recyclage et de valorisation des matériaux composites des éoliennes, voir cet [article](#) (2022) de Justine Beauson (déjà citée plus haut), ingénieure à l'université technique du Danemark DTU. Voir également (technologies, illustrations, etc.) cette [publication](#) de 2023.

Recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est la méthode de traitement des composites la plus économique car elle autorise le recyclage de l'intégralité du matériau traité. Initialement, cette voie a été privilégiée pour la transformation des composites à matrice thermodurcissable renforcés de fibres de verre courtes (SMC, Sheet Molding Compound, et BMC, Bulk Molding Compound) et fibres de verre longues. Cette voie de recyclage peut également être appliquée aux composites renforcés de fibres de carbone mais le coût élevé de ces dernières et leurs très hautes performances mécaniques conduisent à privilégier une forme de fibres continues car l'étape de broyage leur fait perdre une grande partie de leur intérêt.

Le processus de traitement passe par une réduction initiale de la taille des déchets composites par déchiquetage. La phase principale intervient ensuite dans un broyeur à haute vitesse dans lequel le matériau est débité en éléments plus fins allant typiquement de 10 mm à des particules micronisées de moins de 50 µm. Cette phase est le plus souvent suivie de deux étapes complémentaires : la première visant à récupérer des morceaux de taille grossière et la deuxième visant à affiner la granulométrie en fonction de l'usage visé. Une opération de tamisage final permet de fractionner le recyclat obtenu en lots de tailles différentes.

Dans ce procédé, tous les constituants originaux des matériaux composites sont broyés et restent présent dans les recyclats résultants qui se présentent sous la forme d'un mélange de polymères, de fibres et de charges. De façon générale, les fractions tamisées les plus fines sont des poudres et contiennent une proportion de charges et de polymères plus élevées que dans le composite d'origine. Les fractions tamisées les plus grossières ont tendance à être de nature plutôt fibreuse, avec des particules ayant un facteur de forme et un taux de fibres plus élevés (cf. illustration ci-après).



Principe du recyclage mécanique des composites par broyage (source : [Ademe](#), 2022).

Sous la forme de poudre, les recyclats peuvent être utilisés en boucle fermée comme charge en substitution aux charges minérales telles que le carbonate de calcium ou la silice. Toutefois, le taux d'incorporation de ces derniers est limité (moins de 10 % en poids) en raison de la détérioration des propriétés mécaniques du matériau final et des problèmes de mise en œuvre accrues — augmentation de la viscosité du compound à mouler.

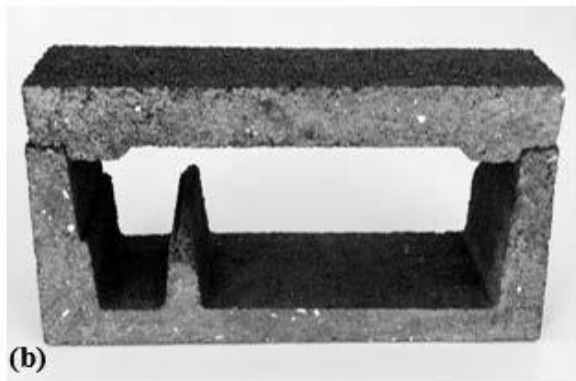
Néanmoins, un avantage à l'utilisation de recyclats est que ces derniers disposent d'une densité plus faible que le carbonate de calcium (de l'ordre de 2,7), de sorte qu'un SMC (Sheet Molding Compound — préimprégné en feuille) contenant 10 % en masse de recyclat substituant les charges minérales peut être jusqu'à 5 % plus léger que son homologue chargé uniquement de carbonate de calcium. Mais le très faible coût des charges vierges (carbonate de calcium, silice) concurrence de façon très forte l'utilisation de recyclats, limitant de ce fait leur volume de valorisation.

En ce qui concerne les fractions fibreuses, ces dernières sont plus difficiles à réutiliser, en particulier comme renfort (même en faible taux de réincorporation) car les propriétés mécaniques des matériaux composites résultants sont significativement altérées. Cet effet est attribué d'une part à un manque d'adhérence entre le recyclat et la matrice polymère, et d'autre part au fait que les recyclats de tailles importantes peuvent être des lieux de concentrations de contraintes dans le composite. En outre, le broyage reste une technique de recyclage très agressive provoquant une dégradation des fibres de renfort. Du fait de la faible longueur (inférieure à 25 mm) et de la disparité d'orientation des fibres produites, l'exploitation du recyclat en tant que renfort reste limité pour les matériaux de seconde génération.

Des études ont démontré que lorsque des fractions fibreuses (provenant de SMC en fibres de verre) similaires aux faisceaux de fibres vierges étaient incorporées dans des BMC (Bulk Molding Compound — préimprégné en vrac) à environ 10 % en masse, le temps de mélange pouvait affecter positivement les propriétés mécaniques des matériaux résultants et permettre d'atteindre des propriétés comparables au matériau standard. Ceci s'explique par une meilleure interface entre le recyclat et la nouvelle résine.

D'autres études ont également montré que les recyclats issus de composites (fibres de verre et résine polyester) pouvaient être valorisés dans des composites thermoplastiques avec des propriétés mécaniques finales sensiblement comparables à un renfort en fibres de verre vierge. Et que des recyclats sous forme de broyats ont pu être utilisés en boucle ouverte dans l'industrie automobile sous forme de charges dans des parties non structurales.

Plusieurs entreprises telles que Reprocover, Conenor (voir encadré ci-après) ou encore Global Fiberglass Solutions se sont spécialisées dans le recyclage de composites renforcés de fibres de verre, essentiellement par une technique de broyage et réincorporation dans une matrice polymérique thermodurcissable ou thermoplastique (cf. illustration ci-après).



Exemples de produits intégrant des déchets issus de matériaux composites thermosable renforcés de fibres de verre : a) [Global Fiberglass Solutions](#), à Bothell, aux États-Unis) ; b) [Reprocover](#), à Verviers, en Belgique) ; c-d) [Conenor](#), à Lahti, en Finlande (source : [Ademe](#), 2022).

Conenor

Actuellement, en Finlande, il y a encore très peu d'éoliennes en cours de démantèlement de sorte qu'il n'est pas intéressant pour les entreprises de gestion des déchets d'investir dans l'expertise correspondante.

Cet [article](#) cite le projet pilote KiMuRa (Kierrätetty Murskattu Raaka-aine — littéralement « matière première broyée recyclée ») relatif au recyclage des déchets composites, lancé en janvier 2021 (jusqu'à l'automne 2022) à l'initiative de la Fédération finlandaise des industries plastiques, du ministère de l'Environnement et de sept entreprises de l'industrie des composites. Ce projet est financé par le programme Muovimiljoona Muovi Miljoona (littéralement « millions de plastiques ») du ministère de l'Environnement.

Dans ce contexte, l'entreprise [Conenor](#) a développé une technologie brevetée pour transformer les déchets composites en nouveaux matériaux composites — par exemple différents profilés et tôles pour l'industrie de la construction.

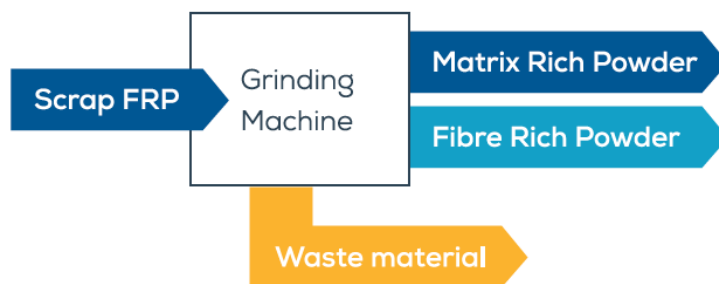
Pour en savoir plus : voir cette [présentation](#) de février 2020.

Le tableau ci-après présente diverses applications envisageables pour les produits issus du broyage de composites thermodurcissables.

Produits	Applications	Quantité introduite	Remarques
Poudre micronisée	Introduction comme charge dans des SMC/BMC	5 à 10 % en masse	Peu compétitif vis-à-vis du coût du broyage par rapport au coût des charges naturelles
Fibres	Remplacement des fibres vierges dans les SMC/BMC	5 à 10 % en masse	Faible volume recyclé
Fibres longues	Béton de dallage	1 à 4 kg/m ³	Marché très concurrentiel avec d'autres types de fibres
Fibres longues	Enrobés routier	0,3 à 0,6 % en masse	Très concurrentiel avec des fibres de cellulose, polyamide et laine de roche
Fibres + poudre micronisée	Composite ciment/verre Bétons ultra-haute performance	0,11 % en vol.	Substitution sans surcoût des adjuvants des bétons
Fibres courtes ou longues	Renforts dans les thermoplastiques	10 à 40 %	Nécessite un traitement de surface pour optimiser la compatibilité fibres/matrice

Applications envisageables pour les produits issus du broyage de composites thermodurcissables (source : [Ademe](#), 2022).

Enfin, dans le cas du recyclage mécanique de composites thermoplastiques (pas encore le cas des pales d'éoliennes), le broyage permet l'obtention des recyclats qui ont la possibilité d'être retransformés sous la forme de granulés ou paillettes réintégréables en boucle fermée, et ce plusieurs fois, dans des cycles d'extrusion ou d'injection.

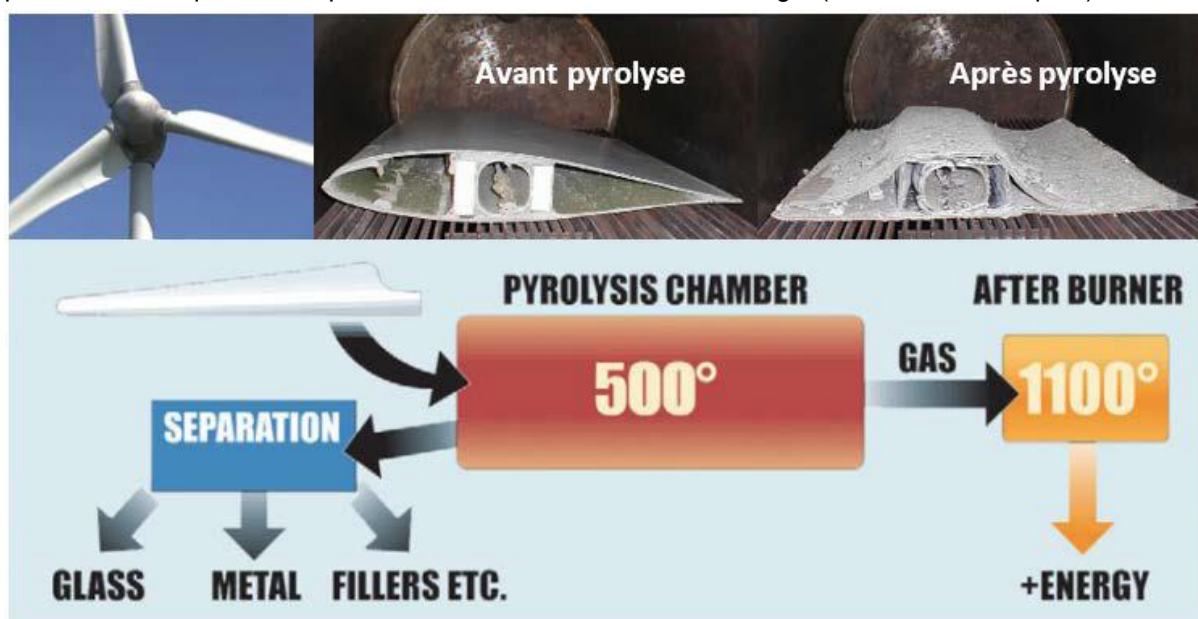


TRL	STRENGTHS	DISADVANTAGES	POINTS OF ATTENTION
Glass fibre: 9 Carbon fibre: 6/7	<ul style="list-style-type: none"> Efficient and high throughput rates 	<ul style="list-style-type: none"> Not competitive (yet) with use of virgin raw materials Quality of recyclates compromised due to the high content of other materials Up to 40% material waste generated during grinding, sieving and processing Consequently, large volume applications not (yet) developed 	<ul style="list-style-type: none"> Requires dedicated facilities with closed area to limit dust emissions

Broyage mécanique (source : [WindEurope](https://www.wind-europe.eu/), 2020).

Recyclage chimique par pyrolyse

Le traitement thermique (pyrolyse) vise à récupérer les fibres de renfort en décomposant et dégradant thermiquement les chaînes polymères de la matrice organique dans une chambre anoxique (absence d'oxygène) à des températures de l'ordre de 300 à 800 °C pendant une durée de plusieurs heures. À l'issue de ce traitement, la matrice est récupérée sous la forme d'huile, de gaz ou de produits de charbons solides. Ces éléments peuvent ensuite être réutilisés comme intrants pour d'autres procédés chimiques ou simplement utilisés comme source d'énergie (cf. illustration ci-après).



Pyrolyse d'une section de pale d'éolienne (source : [Ademe](https://www.ademe.fr/), 2022).

Dans le cas du traitement des composites renforcés de fibres de verre, des pertes de résistance à la traction de l'ordre de 50 % ont été enregistrées après traitement tandis que la rigidité des fibres n'est pas affectée par le traitement thermique. À l'inverse, dans le cas du traitement des fibres de carbone, des études ont montré que les propriétés mécaniques des fibres recyclées pouvaient, dans des conditions opératoires optimales (température, atmosphère), conserver jusqu'à plus de 95 % de leur résistance à la traction tout en présentant un état de surface sans résidus de résine. À noter que les conditions de traitement peuvent fortement varier selon la nature, l'origine et les caractéristiques des composites à traiter — matrice époxy, matrice polyester, renfort en fibres de verre, fibres de carbone

HM à haut module d'élasticité (forte rigidité), fibres de carbone HR de haute résistance (flexibilité), etc. —, nécessitant des ajustements spécifiques pour optimiser chaque traitement.

Une fois récupérées et séparées, les fibres de renfort peuvent être réutilisées comme matériaux d'isolation (réutilisation) ou fibres de renfort (réemploi). À titre d'exemple, la société [ReFiber ApS](#) (Roslev, Danemark) propose des mats de fibres de verre issus de la pyrolyse de pales d'éoliennes — il s'agit bien de mat à base de fibres de verre (fibre de verre non tissée) et non de mât (poteau) en composite. Autre exemple, l'entreprise [Gen2Carbon](#) (Bilston, Royaume-Uni) qui commercialise des structures non tissées contenant 100 % de fibres de carbone recyclées ou en mélange avec des fibres thermoplastiques, destinées à être utilisées dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile ou encore dans les applications de sports et loisirs (cf. illustration ci-après).



Mats issus de fibres de verre (ReFiber ApS, à gauche) ou de fibres de carbone (Gen2Carbon, à droite) recyclées (source : [Ademe](#), 2022).

Le recyclage par pyrolyse reste onéreux pour justifier son utilisation en routine pour le recyclage des composites à base de fibres de verre mais ce procédé apparaît compétitif dans le cas du traitement des composites renforcés par des fibres de carbone, les fibres obtenues conservant une valeur économique supérieure. Le procédé de traitement a atteint l'échelle industrielle chez différents acteurs tels que l'entreprise [Procotex SA Corporation NV](#) (Dottignies, Belgique) — Procotex a fait l'acquisition de l'activité de fibres de carbone courtes d'ELG Carbon Fibre Ltd (Bilston, Royaume-Uni).

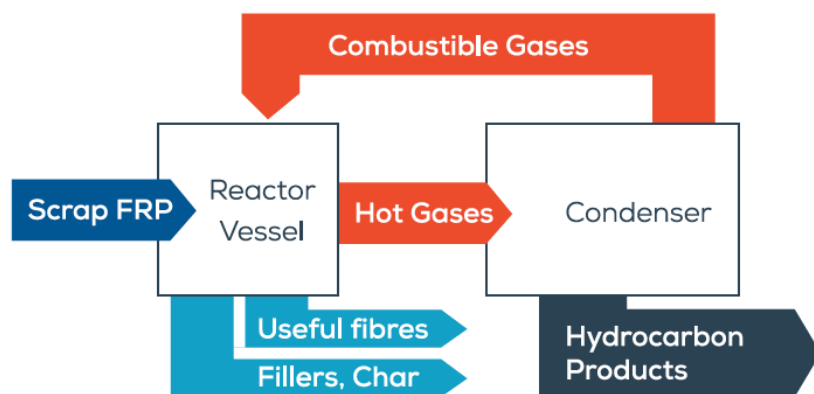
À noter également cette startup espagnole, [Reciclalia](#), déjà présentée plus haut, dans la 1^{re} partie (cf. section Opérations de démantèlement des éoliennes), à propos du dispositif Constrictor (compression des pales) et du procédé CRS (Composite Recycling System) développés par Reciclalia. Reciclalia réceptionne des pales d'éoliennes en provenance du Portugal, d'Afrique du Nord mais aussi de la France. À fin 2021, l'entreprise déclarait recycler 1 500 pales annuellement (~ 500 éoliennes tri-pales).

À partir du broyat de composite produit sur le site de démantèlement par la machine Constrictor et acheminé jusqu'à l'usine de traitement de la startup, située près de Tolède (Castille-La Manche), le procédé thermique CRS (craquage) permet de séparer la matrice organique des fibres de verre mais également des fibres de carbone, selon David Romero, directeur des opérations de l'entreprise. D'après le dirigeant, Reciclalia collabore avec des entreprises innovantes d'autres secteurs que l'éolien (céramique, construction, transport, automobile, aéronautique) pour identifier des nouveaux usages des fibres (verre, carbone) ainsi obtenues. Selon David Romero, le procédé CRS n'altère que très peu les propriétés des fibres (verre ou carbone), qui pourraient être réutilisées dans d'autres applications, sans perte de qualité.

En outre, le bilan énergétique du procédé thermique apparaît favorable, le réacteur intégrant un système de cogénération qui permet de réduire la consommation d'énergie du procédé. Par ailleurs, alors que la production d'une tonne de fibres de verre (carbone) vierges entraîne l'émission de 3 tonnes éqCO₂ (13 teqCO₂, respectivement), le procédé CRS n'émettrait que 0,5 teqCO₂ environ, et ce quelle que soit la nature de la fibre de renfort (verre ou carbone).

Enfin, Reciclalia voit grand et ambitionne d'ouvrir deux usines supplémentaires en Espagne, une en France et une autre en Allemagne ou aux Pays-Bas, avec comme « objectif d'avoir, d'ici à 2025, une capacité de recyclage cumulée d'environ 40 000 tonnes par an, en incluant les déchets d'autres secteurs que l'éolien — par exemple l'aéronautique », selon son dirigeant.

Le traitement des composites par pyrolyse connaît actuellement des évolutions qui feront l'objet d'un développement spécifique à l'étape 2.



TRL	STRENGTHS	DISADVANTAGES	POINTS OF ATTENTION
Pyrolysis: 9 Microwave: 4/5	<ul style="list-style-type: none"> The bi-products (Syngas and oil) can be used as energy source or as base chemicals/building blocks Easily scaled-up Microwave pyrolysis: Easier to control. Lower damage to the fibre Already used at commercial scale for recycling carbon fibre composites 	<ul style="list-style-type: none"> Fibre product may retain oxidation residue or char Loss of strength of fibre due to high temperature Decreased quality of the recovered carbon fibres from original material (lowest value loss in comparison to other mature recycling technologies) 	<ul style="list-style-type: none"> Economically sound for carbon fibre recovery to date

Pyrolyse (source : [WindEurope](#), 2020).

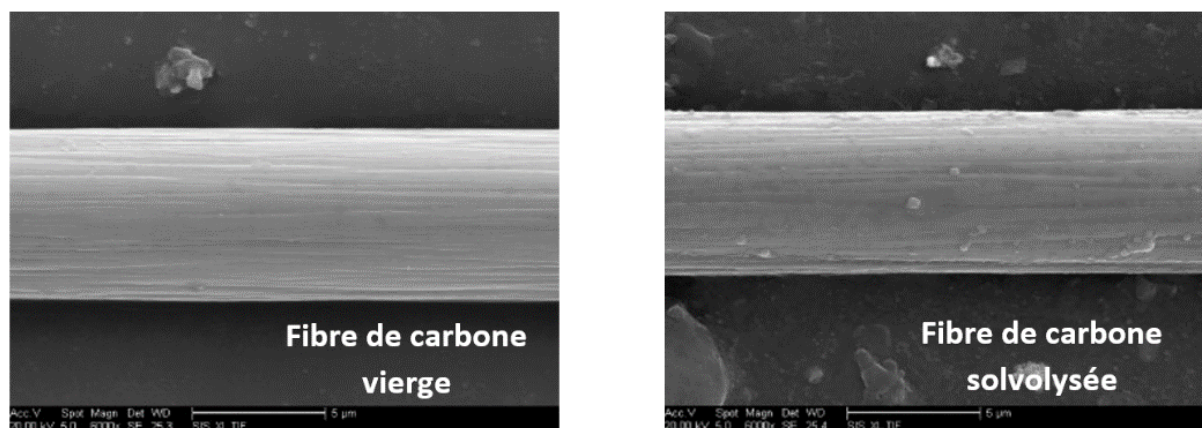
Recyclage chimique par solvololyse

Le recyclage chimique (solvololyse) concerne principalement le traitement des composites thermodurcissables — cas des pales d'éoliennes dans leur immense majorité — et consiste à décomposer la portion organique du matériau composite par dépolymérisation et, ainsi, dissocier les fibres de la matrice. Dans cette voie de recyclage, l'eau apparaît comme le solvant le plus utilisé (généralement au point supercritique à 374 °C et 221 bars). D'autres solvants ayant une température et une pression critique plus basses (éthanol, méthanol, propanol, acétone) peuvent également être utilisés seuls ou en mélange avec l'eau afin de moduler les conditions réactionnelles. Des additifs ou catalyseurs peuvent être ajoutés dans le but d'optimiser la cinétique du procédé. Mis en œuvre en milieu acide (acides nitrique, sulfurique ou acétique), les traitements solvolytiques peuvent être réalisés à une température inférieure à 200 °C et à pression atmosphérique. Mais l'emploi de catalyseurs et d'acides forts peut être préjudiciable non seulement s'agissant des propriétés mécaniques des fibres obtenues, mais aussi au regard des aspects environnementaux et des conditions de santé et de sécurité au travail. En outre, l'élimination des catalyseurs et des acides nécessitent plusieurs étapes additionnelles de lavage, susceptibles de constituer un frein économique.

Selon la nature de la résine utilisée, des températures et pressions plus ou moins élevées sont nécessaires pour dégrader la résine. Ainsi, les résines polyester sont plus faciles à solvololyser que les résines époxy qui nécessitent des températures plus élevées pour être dégradées. Au cours de la dernière décennie, ce procédé a surtout été étudié pour le recyclage des composites à base de fibres de carbone, aux fins de récupérer des fibres de carbone suscitant un intérêt commercial.

En fonction de la quantité de solvant et de la température appliquée, le fluide peut se présenter sous la forme de vapeur, liquide biphasique ou supercritique. Lorsque le fluide est en phase vapeur ou à une densité semblable à celle d'un gaz à l'état de fluide supercritique, le procédé est assimilable à un processus thermique (plus qu'à une solvololyse), comme le montrent certaines études traitant de la dégradation de composite à base de fibres de carbone par un procédé hydrothermique utilisant l'eau comme solvant.

En raison de la faible valeur économique et de la fragilité des fibres de verre exposées à des conditions thermiques, acides et alcalines, peu d'études ont été consacrées au traitement chimique des composites à base de fibres de verre. La littérature existante suggère que le traitement par voie chimique affecte fortement les propriétés mécaniques des fibres de verre, avec des diminutions de la résistance à la traction comprises entre 35 et 65 % selon la température appliquée. Concernant la fibre de carbone, le recyclage par voie chimique permet de récupérer des fibres de longueur variable avec une topologie de surface quasi identique aux fibres vierges (cf. illustration ci-après). La longueur des fibres traitées dépend des dimensions de la pièce composite à recycler et de celles du réacteur de traitement. De nombreuses études montrent que les fibres de carbone après traitement conservent près de 95 % de leurs propriétés mécaniques par rapport à des fibres vierges. Sous l'angle économique, le coût des installations rend l'exploitation de ce procédé viable uniquement pour le recyclage des fibres à haute valeur ajoutée telles que les fibres de carbone.

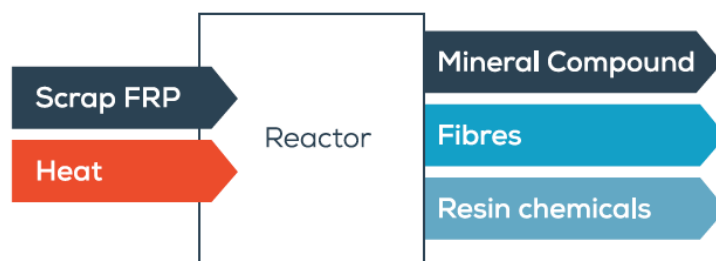


Comparaison de l'état de surface d'une fibre de carbone vierge et d'une fibre de carbone après traitement chimique (source : [Ademe](#), 2022).

Comparativement aux procédés de pyrolyse, des températures plus basses sont requises pour dégrader chimiquement les polymères (polyester et époxy en particulier) et le potentiel de récupération de la valeur chimique de la résine est plus élevé. Mais cette voie de recyclage nécessite un tri rigoureux des déchets à la source, la coexistence de déchets composites de nature chimique différente empêchant un recyclage optimum.

Si jusqu'à présent les technologies de traitement par voie chimique étaient à des niveaux de maturité technologique relativement modérés, certaines entreprises proposent aujourd'hui des traitements à l'échelle semi-industrielle. Ainsi, la société toulousaine [Alpha Recyclage Composites](#) dispose depuis 2019 d'un pilote de traitement préindustriel par vapo-thermolyse (procédé combinant pyrolyse et vapeur d'eau surchauffée) dont la capacité de production peut avoisiner les 300 tonnes de fibres de carbone recyclées annuellement. De la même façon, l'entreprise [Extractive](#), basée à Sorgues (Vaucluse, Provence-Alpes-Côte d'Azur), propose un procédé de traitement par solvolyse qui permet d'ores et déjà de traiter des volumes de fibres équivalents.

À l'instar des traitements par pyrolyse, le traitement des composites par solvolyse connaît actuellement des évolutions qui feront l'objet d'un développement spécifique à l'étape 2.



TRL	STRENGTHS	DISADVANTAGES	POINTS OF ATTENTION
5/6	<ul style="list-style-type: none"> Recovery of clean fibres at their full length Soup of resin chemicals produced which can be used as chemical building blocks Low risk solvents are used such as alcohols, glycols and supercritical water 	<ul style="list-style-type: none"> High energy consumption due to high temperature and high pressure of some processes Uses large volumes of solvents, although these are mostly recovered and reintegrated into the process Decreased quality of the recovered carbon fibres from original material 	<ul style="list-style-type: none"> To date only the carbon fibres are recycled

Solvolyse (source : WindEurope, 2020).

Valorisation énergétique : combustible solide de récupération (CSR)

L'appellation combustible solide de récupération (CSR) est un terme générique qui regroupe tous types de déchets non dangereux solides, non constitués de biomasse uniquement, et dont le pouvoir calorifique est suffisamment élevé pour présenter un intérêt en valorisation par combustion, en substitut des combustibles fossiles. On distingue le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI). Dans les deux cas, il s'agit de l'énergie thermique libérée par la combustion d'un kilogramme de combustible mais l'énergie de vaporisation de l'eau présente en fin de réaction est seule prise en compte pour le calcul du PCS ($PCS = PCI + \text{chaleur latente d'évaporation}$). Les CSR se différencient de la simple incinération (infra) de déchets par la qualité du produit généré afin de répondre à un cahier des charges client qui impose un tri et un contrôle qualité à la production — phase de tri préalable pour éliminer la présence éventuelle de PVC et conserver une production stable en terme de PCI.

La valorisation énergétique comme combustible solide de récupération (CSR) est largement développée à l'échelle européenne. À titre indicatif, la réglementation française ([arrêté](#) du 23 mai 2016) exige que les CSR présentent un PCI brut (rendement utile) supérieur ou égal à 12 MJ/kg — le charbon présente un PCI d'environ 30 MJ/kg et le bois un PCI d'environ 20 MJ/kg.

Il n'existe pas de composition type de CSR, qui varie en fonction des pays, des sites de production et des utilisations qui en sont faites. Généralement produits directement sur les sites de tri et de traitement de déchets, les CSR ont une composition qui est liée aux rebus des filières de valorisation matière. De manière générale, la valorisation matière conduit à des produits dont les valeurs financières sont comprises entre quelques centaines d'euros à quelques milliers d'euros la tonne, soit jusqu'à un ordre de grandeur au-dessus d'un produit à vocation énergétique. Ainsi, la valorisation énergétique est perçue comme une voie d'élimination pour valoriser des produits permettant de limiter le recours à l'enfouissement. Ainsi, ces déchets combustibles sont essentiellement utilisés dans des fours adaptés (cimenteries en général) et dans des chaudières de production d'énergie (vapeur et/ou électricité) dans les collectivités locales et les industries.

Au vu de leur composition, la transformation des déchets composites thermoplastiques et thermodurcissables en CSR peut donc être une voie intéressante si aucune des solutions de recyclage ne peut être appliquée. Toutefois, plusieurs aspects doivent être pris en compte notamment pour la transformation CSR des composites de type polyester renforcés de fibres de verre. En effet, la présence de fibres de verre peut conduire à une usure prématurée, par abrasion, des installations de type broyeurs. En outre, si la partie organique des matériaux composites présente une énergie de

combustion importante (cf. illustration ci-après), la forte proportion de fibres de verre dans ces mêmes matériaux peut réduire de façon significative le pouvoir calorifique global.

Matériau	Energie de combustion (MJ/kg)
Polyethylene (PE)	48
Polypropylene (PP)	46
Polyvinyl Chloride (PVC)	18
Epoxy Novolac, catalytic cure (phenoxy-N)	31
Polyester insaturé	26
Charbon, Anthracite	33
Lignite	28
Papier, journaux	20

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) de certains polymères et matériaux utilisés en CSR (source : [Ademe](#), 2022).

Sur la méthode de coprocessing des CSR mise en œuvre dans les cimenteries (double valorisation : énergétique de la partie organique et matière des charges minérales), revoir la 1^{re} partie de l'étape 1 (cf. section Technologies et procédés de recyclage et valorisation). Il s'agit actuellement de la méthode la plus viable économiquement pour les composites renforcés de fibres de verre (pales d'éoliennes).

Pour mémoire, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEJET notaient que des unités de fabrication de CSR avaient été mises en place par des entreprises du secteur du recyclage, produisant à destination exclusive de l'industrie cimentière un CSR préparé par mélange et homogénéisation de déchets issus de plusieurs sources (pales d'éoliennes mais aussi résidus de broyage automobile RBA, etc.), et dont le PCI est de l'ordre de 20 000 kJ/kg, voire plus. Plusieurs pales d'éoliennes alors démantelées en France avaient suivi ce processus, une voie également empruntée par les Allemands, qui paraît la seule à court et moyen terme susceptible d'assurer un traitement quantitativement et qualitativement efficace des pales d'éoliennes à démanteler d'ici 2030.

Selon cet [article](#) (oct. 2021) d'Infociments, les combustibles solides de récupération (CSR) constituent une valorisation énergétique (combustion) et matière (cendres issues de leur combustion) dans le process de cuisson du clinker. En vertu de cette valorisation mixte matière-énergie des pales en cimenterie, bien que d'autres installations (chaufferies biomasse, centrales de production d'électricité, etc.) utilisent également des CSR comme combustibles alternatifs, les cimenteries constituent leur exutoire le plus performant. Selon cette même source, l'utilisation de CSR par l'industrie cimentière devrait connaître une croissance importante dans les années à venir. Les cimentiers visent ainsi une consommation de 1 Mt/an d'ici à 2025, contre 300 000 tonnes en 2019.

Concernant la valorisation des pales en cimenterie, il a été vu plus haut que, pour la France, le gisement de déchets de matériaux composites à base de fibres de verre issus du démantèlement des éoliennes en fin de vie est estimé à 229 000 tonnes (dont ~ 70% de fibres de verre, soit ~ 160 000 tonnes) sur l'ensemble du parc français pour la période 2022-2040, avec un maximum de près de 15 000 tonnes en 2031 — revoir la 1^{re} partie de l'étape 1 (cf. section Gisement des éoliennes en fin de vie).

Selon cette [brochure](#) (2023) de France Ciment, la production de clinker en France avoisine les 12 Mt/an, nécessitant 18 Mt de matières (il faut compter environ 1,5 t de matériaux pour 1 t de clinker) dont 20 % (soit 3,6 Mt — les ciments courants sont élaborés à partir d'un mélange d'environ 80 % de calcaire et 20 % d'argile) de type Si/Al/Fe pour lesquelles les composites avec fibres de verre peuvent être un matériau de substitution — a priori, importante marge d'incorporation des déchets de matériaux composites à base de fibres de verre issus du démantèlement des éoliennes en fin de vie. Selon cette même brochure, en 2022, les chiffres clés de la valorisation mixte énergétique et matière de déchets (CSR, mais aussi pneus, huiles et solvants usagés, eaux polluées, farines animales, semences impropres, etc.) lors de l'étape de cuisson dans le process cimentier sont :

- volumes de déchets en valorisation énergétique : > 1,160 Mt (soit 50 % du besoin énergétique du procédé cimentier) ;
- Volumes de déchets en valorisation matière : > 0,142 Mt (sous forme d'incorporation des cendres au clinker).

Selon les résultats de cette [étude](#) irlandaise, publiés le 20 décembre 2020, le coprocessing s'avère moins impactant pour l'environnement et la santé que la mise en décharge. Dans cet article, les chercheurs rapportent une analyse comparative du cycle de vie entre la mise en décharge et le cotraitement (coprocessing en cimenterie) des déchets de pales d'éoliennes démantelées.

Le 8 décembre 2020, GE Renewable Energy et Veolia North America ont signé un [accord](#) (CP Veolia) aux termes duquel Veolia recyclera les pales issues de parcs éoliens terrestres situés aux États-Unis, démantelés par GE Renewable Energy lors d'opérations de repowering.

Les pales (90 % en poids) sont déchiquetées dans l'usine de traitement de Veolia (Missouri), puis utilisées en cimenteries (coprocessing dans les fours à ciment) à travers les États-Unis. Selon Veolia, plus de 65 % du poids des pales remplace les matières premières (valorisation matière) qui seraient autrement ajoutées au four pour fabriquer le ciment (clinker), et près de 28 % du poids des pales fournit l'énergie (valorisation énergétique) nécessaire à la réaction chimique qui se produit dans le four.

Reconnu aux États-Unis pour être à la pointe du recyclage des pales d'éoliennes, [Veolia](#) avait traité plus de 2 500 pales à la fin 2022.

Le 10 juin 2021, [GE Renewable Energy](#) et [LafargeHolcim](#) (filiale allemande [Geocycle](#)) ont signé un protocole d'accord pour étudier des solutions de recyclage des matériaux provenant d'éoliennes mises hors service — y compris comme matériaux de construction pour de nouveaux parcs éoliens. Dans le cadre de cet [accord](#), les deux entreprises s'engagent à développer des solutions pour transformer les pales d'éoliennes de GE Renewable Energy en fin de vie en énergie et en matériaux de construction.

Le même jour, GE Renewable Energy et l'entreprise allemande [Neowa](#) (cf. infra) ont annoncé un [accord](#) portant sur le démantèlement et le recyclage d'éoliennes terrestres, aux termes duquel neowa sera chargée de démonter les éoliennes de GE Renewable Energy en fin de vie et, grâce à un procédé de déchiquetage propriétaire, de produire à partir des pales le matériau (pellets de différentes tailles) qui sera fourni à LafargeHolcim pour être utilisé comme matière première (silice) et source d'énergie (combustion) dans la production de ciment (projet au stade de la R&D). Le ciment résultant de ce processus peut être utilisé notamment pour construire des fondations pour de nouvelles turbines (meilleure circularité), utilisant environ 20 % de CO2 en moins par rapport aux processus conventionnels (empreinte carbone réduite). La totalité de la masse des pales devrait être traitée et réutilisée.

Un peu plus tôt, le 8 décembre 2020, GE Renewable Energy avait [annoncé](#) (CP GE) un accord avec Veolia North America pour le premier programme américain de recyclage de pales d'éoliennes en cimenteries, permettant notamment — selon le communiqué — une réduction nette de 27 % des émissions de CO2 (cf. supra).

Selon cet [article](#) daté du 21 octobre 2021, les pales d'éoliennes en fin de vie. — matériaux composites à base de polymères (matrice) renforcées par des fibres de verre (charge) — sont traitées dans cette cimenterie du groupe LafargeHolcim à Lägerdorf en Allemagne. La solution a été mise en place par la société Geocycle, filiale du groupe LafargeHolcim, spécialisée dans la gestion des déchets et pionnière dans cette technologie.

Le broyat de pale est utilisé dans les fours, à la fois comme combustible (fraction organique) en remplacement du charbon et comme matière première (fraction minérale issue des fibres de verre) en remplacement partiel du sable et de l'argile nécessaires à la fabrication du clinker.

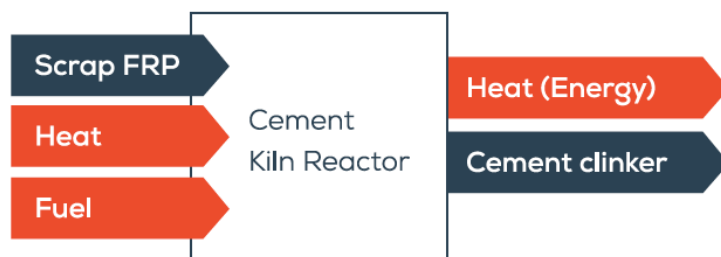


Cimenterie du groupe LafargeHolcim utilisant des pales d'éoliennes en fin de vie (source : site d'information [Révolution Énergétique](#), 2021).

À propos de [neowa GmbH](#) (Lunebourg), du projet [neocomp GmbH](#) (Brême) et de la marque [Fiberglass Recycling Europe](#) (collecte, transport et recyclage des déchets de composites à base de fibres de verre en cimenterie), voir cette [présentation](#) de Mika Lange, directeur général de neowa GmbH, faite lors d'un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire), organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), le 21 mai 2019 à Paris.

Mika Lange y indique notamment un taux de récupération de 100 % permis par la méthode de coprocessing dans l'industrie cimentière. À la base, un traitement mécanique exigeant des matériaux composites (broyage mécanique à sec et l'homogénéisation du produit de substitution aux matières premières dans la production de ciment (dimensions < 40 mm).

Neowa GmbH est membre fondateur de l'association industrielle pour le repowering, le démantèlement et le recyclage des éoliennes [RDRWind e.V.](#) (déjà citée plus haut — Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen e.V.).



TRL	STRENGTHS	DISADVANTAGES	POINTS OF ATTENTION
9	<ul style="list-style-type: none"> Highly efficient, fast and scalable Large quantities can be processed Capability to reduce CO₂ emissions of cement manufacturing by up to 16% Slightly increasing energy efficiency of cement manufacturing No ash left over 	<ul style="list-style-type: none"> Loss of original fibre's physical shape 	<ul style="list-style-type: none"> Pollutants and particulate matter emissions (although appropriate mitigation exists in compliance with the Industrial Emissions Directive) So far only suitable for glass-reinforced composites

Coprocessing en cimenteries (source : [WindEurope](#), 2020).

Valorisation énergétique : incinération

Outre la voie de transformation des matériaux en CSR, les déchets composites peuvent être utilisés comme combustibles de substitution dans des unités d'incinération conventionnelles pour la récupération d'énergie tel qu'on le retrouve dans la gestion des déchets ménagers non valorisables. À la différence des CSR, le tri préalable des déchets n'est pas obligatoire conduisant à de possibles variabilités de la qualité des gisements en termes de PCI et de composition. De ce fait, les installations d'incinération doivent disposer de filtres pour capter des polluants organiques issus de la combustion des déchets, contrairement aux installations utilisatrices de CSR.

Les composites therm durcissables peuvent être utilisés comme combustibles de substitution en cimenterie — compatibilité avec les matrices cimentaires due à la présence des matières minérales (carbonate de calcium, alumine, silice).

Dans cette [présentation](#) de Frauke Germer, chercheuse à l'université des sciences appliquées de la Hochschule Bremen (HSB à Brême), faite lors d'un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire), organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), le 21 mai 2019 à Paris, qui porte sur le projet [RecycleWind](#), un réseau résilient et autoapprenant dédié au recyclage des pales d'éoliennes, conduit à l'institut IEKrW (Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft) de la Hochschule Bremen d'août 2020 à janvier 2022, la chercheuse notait que lors de l'incinération de déchets de matériaux composites à base de fibres de verre, des fibres alvéolaires (c'est-à-dire « respirables » en référence aux alvéoles pulmonaires, de dimension < 3 µm) ont été retrouvées dans les scories.

Synthèse

Dans ce [document](#) d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres, publié en novembre 2020 (déjà cité plus haut), WindEurope propose, sous la forme d'un tableau, une synthèse des solutions de recyclage et de valorisation des matériaux composites (cf. illustration ci-après). Les solutions évoquées ci-avant y apparaissent sur fond jaune, les autres méthodes — traitées à l'étape 2 — sur fond bleu.

	RECYCLING TECHNOLOGY	TYPE	MATURITY LEVEL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL)	COST
GLASS FIBRE	Cement co-processing	Thermal	9	Low
	Mechanical grinding	Mechanical	9	Low
	High Voltage Pulse Fragmentation	Electro-mechanical	6	High investment and running costs
CARBON FIBRE	Pyrolysis & Microwave Pyrolysis	Thermal	Pyrolysis: 9 Microwave pyrolysis: 4/5	High investment and running costs
	Solvolyis	Chemical	5/6	High investment and running costs
	Fluidised Bed	Thermal	5/6	High investment and running costs

Synopsis des solutions de recyclage et de valorisation des matériaux composites issus des éoliennes en fin de vie (source : [WindEurope](#), 2020).

Sur la plupart des aspects — technologiques, économiques, environnementaux¹⁵, industriels, intersectoriels, recherche et innovation¹⁶, etc.) — liés à la thématique du recyclages des pales d'éoliennes, voir les travaux menés par l'Energy Transition Alliance — entité formée par l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#), centre d'innovation technologique et de recherche mis en place par Innovate UK au Royaume-Uni) et l'Oil & Gas Technology Centre (OGCT, aujourd'hui le [Net Zero Technology Centre](#) — NZTC, Aberdeen, Écosse) :

- rapport de [phase 1](#), publié en mars 2021 ;
- rapport de [phase 2](#), publié en juin 2021.

Revenant sur le périmètre de la France, le 7 mars 2023 à Bordeaux s'est tenu [R4 Composites](#), rendez-vous national des acteurs de la chaîne de valeur pour le développement d'une économie circulaire des composites. Des acteurs des différentes filières (aéronautique, automobile, éolien, nautisme) ont participé à cet évènement (en présentiel, pas de webinaire ni d'actes du colloque) centré sur les enjeux autour des composites (environnementaux, économiques, réglementaires, technologiques, organisationnels, etc.) et selon 4 axes « R » — réduction, réparation, réutilisation et recyclage des composites.

Une table ronde était dédiée à la fin de vie des pales d'éoliennes (avec AD3R, ARKEMA, SUEZ, VALOREM, VESTAS), ainsi que plusieurs pitches portant sur différents projets, procédés ou solutions — ceux-ci feront l'objet d'un développement spécifique à l'étape 2.

Le téléchargement des [présentations](#) nécessite un mot de passe transmis exclusivement aux participants à cet évènement — metteurs sur le marché, utilisateurs finaux, collecteurs, recycleurs, transformateurs.

Des retours sont attendus de la part des organisations sollicitées dans les différents pays européens (échelle des pays), telles que mentionnées ci-avant à la section Devenir des éoliennes en fin de vie.

WindEurope n'a pas répondu de manière détaillée sur ce point, renvoyant à cette [synthèse](#) et à ce [rapport](#) — des documents publiquement accessibles bien identifiés et exploités par les auteurs de la présente étude — pointant les enjeux pour les différentes technologies et solutions, en termes d'efficacité énergétique, de performance des procédés et des matériaux (qualité du recyclage et des recyclats obtenus), et d'échelle (industrialisation). WindEurope indique également deux cimenteries en Europe, qui traitent des déchets de matériaux composites issus de pales d'éoliennes : [Holcim](#), à Lägerdorf (Allemagne), et [Finnsementti](#), à Turku (Finlande). Selon WindEurope, des études ACV (analyse du cycle de vie) des diverses solutions de recyclage et de valorisation sont en cours ou achevées dans le cadre de nombreux projets, mais les résultats de ces travaux ne sont pas encore largement diffusés, ni nécessairement représentatifs des opérations à grande échelle.

¹⁵ Les aspects environnementaux et sanitaires sont peu documentés — voir par exemple cette [référence](#) de 2023, parmi d'autres.

¹⁶ Cf. étape 2.

1.2.8 - Viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes

Cette partie vise à estimer les volumétries des marchés de revente et les prix de reprise des matériaux recyclés (granulats béton, ferreux et non-ferreux type cuivre, fibres verre et carbone, terres rares, CSR, etc.) et, sur la base de retours d'expérience d'opérations de démantèlement et de recyclage d'éoliennes, établir la rentabilité opérationnelle que cette activité est susceptible de générer.

La rentabilité opérationnelle que peut générer l'activité du recyclage est fonction de l'écart entre les coûts des opérations de démantèlement et de recyclage d'une part et, d'autre part, les produits que peut en retirer le recycleur, à savoir (cf. 1^{re} partie, section Viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes) :

- coût des opérations : coûts du chantier de démantèlement (équipements, main d'œuvre, prétraitement sur site), coûts d'élimination des divers matériaux (composites, bétons), etc. ;
- produits financiers : montant facturé à l'exploitant du parc, vente de machines entières, vente de pièces détachées, vente des métaux ferreux et non ferreux, vente des granulats béton, vente des divers matériaux par exemple fibres de verre ou de carbone, terres rares, CSR, etc.

Une revue de presse et d'Internet, réalisée sur les dernières années (2020 à 2023) à l'échelle mondiale, n'a pas permis de collecter des données publiquement accessibles à même de renseigner précisément ces sujets. Il apparaît toutefois que les postes de coût les plus importants sont, dans le démontage, ceux liés à la mise en œuvre des grues, tandis que le transport des gros composants de la turbine représente la dépense la plus importante des coûts d'élimination.

Des échanges avec l'entreprise [Elys](#) (déjà citée plus haut) ont permis d'apporter un éclairage. Il ressort que les coûts de démantèlement et d'évacuation sont de l'ordre de 150 k€/éolienne. La valorisation des composants — très variable — s'échelonne entre 25 k€/éolienne et 150 k€/éolienne, en fonction de la valeur de la machine et de sa destination (réemploi, réutilisation de pièces de rechange, rebus), de sorte que le coût net pour le maître d'ouvrage varie de 0 k€/éolienne à 125 k€/éolienne. Ce point de vue est en cohérence avec celui de [Q Energy France](#) (déjà citée plus haut) : coût des opérations autour de 150 à 200 k€/éolienne, tandis que le produit est souvent « de l'ordre de quelques dizaines k€/éolienne ».

Des retours sont attendus de la part des organisations sollicitées dans les différents pays européens (échelle des pays — WindEurope a répondu sur ce point mais absence de connaissance), telles que mentionnées ci-avant à la section Devenir des éoliennes en fin de vie.

2 - Perspectives d'évolution (Étape 2)

Cette étape vise à anticiper les évolutions possibles de la filière de fin de vie des éoliennes et identifier les principaux leviers à actionner dès à présent pour améliorer la circularité de cette filière, en réalisant un état de l'art des recherches et développements actuellement en cours à l'échelle mondiale, et portant non seulement sur les procédés et technologies de recyclage proprement dits mais aussi sur la possibilité de mettre en œuvre des matériaux innovants, plus performants en termes de recyclage.

Cette étape est abordée selon deux angles, non limités aux seuls procédés et méthodes actuels de recyclage mais prenant également en considération les développements relatifs à des matériaux nouveaux :

- le recyclage des pales ;
- le recyclage des aimants permanents.

La réalisation de l'étape 2 s'appuie en particulier sur :

- la consultation de sources ouvertes : examen de tous documents et travaux disponibles dans la sphère publique — recherches Internet, études et rapports, extraction de bases de données de presse généraliste ou spécialisée, extraction de bases de données d'entreprises, sites de salons spécialisés, sites spécialisés, etc. ;
- l'analyse des sites Internet des acteurs identifiés ;
- des entretiens (téléphoniques ou par visioconférence) conduits auprès d'experts identifiés par les auteurs au cours de la mission.

2.1 - Les pales

2.1.1 - Méthodes et procédés de recyclage

Dans cette sous-partie, il s'agit d'identifier et d'analyser les travaux récents concernant les procédés de séparation et recyclage des matériaux constitutifs des pales d'éoliennes (technologies : pyrolyse rapide, vapopyrolyse, solvolysse, vaposolvolyse, microondes, courants électriques pulsés) en renseignant (selon disponibilité et/ou accessibilité des informations recherchées) les éléments suivants pour les différentes technologies identifiées :

- le rendement des procédés ;
- la qualité des fibres récupérées (degré de pureté, longueur, pertes de propriétés mécaniques le cas échéant) ;
- les coûts d'équipements et de fonctionnement associés ;
- les impacts environnementaux connus ou prévisibles des procédés.

Recyclage mécanique

Pour mémoire, la méthode de broyage mécanique fin a été traitée précédemment (cf. Étape 1). Ce procédé permet une séparation efficace de la résine et des fibres de verre (procédé non mature pour les fibres de carbone) mais la dégradation des propriétés mécaniques des fibres (de verre) est irréversible. C'est le procédé le plus économique avec l'incinération dans les cimenteries.

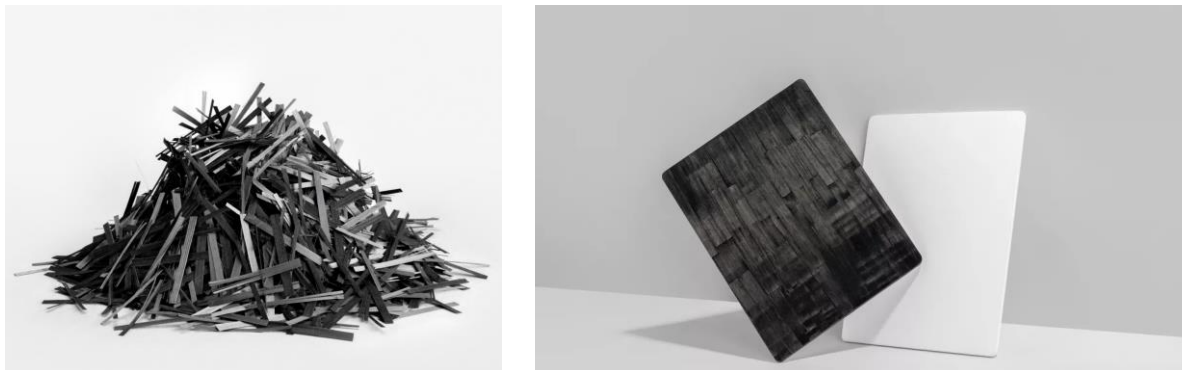
Zoom sur l'entreprise Fairmat

En complément, il convient de mentionner le cas de la deeptech française [Fairmat](#), qui recycle une large gamme de produits composites à base de fibres de carbone — profils préimprégnés et pultrudés, déchets de production de pièces (scrap), produits en fin de vie (pales d'éoliennes) — et propose la fabrication de produits composites de seconde génération (stratifiés, pièces).

Contrairement aux techniques de traitement à forte consommation d'énergie (pyrolyse, solvolysse), le procédé mis en œuvre par Fairmat repose sur un traitement mécanique à froid. Mais plutôt que de broyer les déchets (cf. broyage mécanique fin), Fairmat utilise une technologie de découpe propriétaire, intégrant la robotique et l'intelligence artificielle par machine learning, qui permet de

maintenir ensemble la résine thermodurcissable et les fibres (résine et fibres ne sont pas dissociées lors du processus), et de préserver la longueur des fibres de carbone et (en partie) leurs performances mécaniques — « les courbes de flexion et de résistance sont nettement supérieures à la moyenne des matériaux recyclés », selon le dirigeant de Fairmat.

La découpe « intelligente » et de très haute précision génère des briques de quelques centaines de micromètres d'épaisseur. Les matériaux composites recyclés se présentent sous la forme de panneaux noirs qui, s'ils ne possèdent pas les performances de la matière vierge, peuvent remplacer le bois, le plastique, l'aluminium, voire l'acier. À noter que les performances des produits recyclés sont reconstituées, après découpe, lors de la remise de la matière à un format donné et sa réagrégation de manière ordonnée, avec ajout de résine vierge (cf. illustration ci-après).



Recyclat (à gauche) et panneaux de composites à base de fibres de carbone reconstitués (à droite) (source : Fairmat, 2023).

Fairmat a établi des partenariats et conclu des accords avec différents grands acteurs industriels, en particulier :

- collaborations en R&D avec :
 - o [Siemens Gamesa](#), à Aalborg (Danemark) : Fairmat collecte les déchets de production issus de la fabrication des pales d'éoliennes sur le site de production danois de Siemens Gamesa (voir le [CP](#) de Fairmat, le 5 mai 2022),
 - o [Tarmac Aerosave](#), à Azereix (Hautes-Pyrénées, Occitanie) — stockage, maintenance, transition et recyclage d'avions : une partie des pièces d'avions en fin de vie contenant des composites à base de fibre de carbone traitées par Tarmac Aerosave sont récupérées par Fairmat ;
- partenariat de développement industriel avec :
 - o [Duqueine Group](#), à Massieux (Ain, Auvergne-Rhône-Alpes) — fabrication de pièces composites pour l'aéronautique, l'automobile, le médical, les sports et loisirs : Fairmat recycle les chutes de production.

À titre indicatif, voir ce [post](#) (2023) sur LinkedIn d'Alice Balagué, Chief Impact Officer chez Fairmat.

Zoom sur l'entreprise GFSI

L'entreprise américaine Global Fiberglass Solutions Inc. ([GFSI](#), déjà cité plus haut — cf. Étape 1) s'est spécialisée dans le recyclage de composites renforcés de fibres de verre, par une technique de broyage puis réincorporation dans une matrice organique.

Le site Internet de l'entreprise, resté inactif plusieurs mois, est accessible depuis l'été 2023. Aujourd'hui, GFSI propose à la vente deux types de produits recyclés : des [fibres](#) de verre destinées à (et formulées de manière ad hoc — tailles, formes) diverses applications industrielles et des [granulés](#) (EcopolyPellets) utilisables (formulés de manière ad hoc également) dans des procédés de plasturgie tels que l'extrusion, le moulage par injection, etc. (cf. illustration ci-après).



Granulés EcopolyPellets (source : [GFSI](#), 2023).

Selon GFSI, les produits de type « EcoPoly » trouvent des [applications](#) dans de nombreux domaines — dalles de sol, panneaux pour le bâtiment, palettes, glissières de sécurité, plaques d'égout, skateboards, meubles, etc.

Zoom sur l'entreprise Regen Fiber

L'entreprise américaine [Regen Fiber](#), basée à Des Moines (Iowa), recycle les fibres de verre issues de pales d'éoliennes en fin de vie et les propose aux industriels désireux de renforcer leurs structures en béton. La société a commencé à développer ses fibres en 2021 avec l'aide d'industriels du béton pour s'assurer que ses produits répondraient bien à leurs cahiers des charges, le déploiement à grande échelle des opérations de recyclage de pales étant prévu à partir de la deuxième moitié de 2023 — un nouveau site industriel est actuellement en cours de construction à Fairfax (Iowa). Regen Fiber prévoit alors de recycler plus de 30 000 tonnes de pales par an.

Selon un procédé entièrement mécanique en instance de brevet, les déchets de pales sont déchiquetés en morceaux de la taille d'une fibre — plutôt que fondus, broyés mécaniquement ou encore traités chimiquement — puis les particules résultantes sont transformées et préparées en vue de leur réutilisation comme renforts fibreux (cf. illustration ci-après).



Fibres de verre recyclées selon le procédé de Regen Fiber (source : [Regen Fiber](#), 2023).

En fonction de l'usage final envisagé (bétons et mortiers, chaussées et asphalte, dalles de sol, structures composites préfabriquées pour le BTP, etc.), les matériaux suivent des voies de traitements appropriées (cf. illustration ci-après).



Voies de recyclage de pales d'éoliennes selon Regen Fiber (source : [Regen Fiber](#), 2023).

Zoom sur l'entreprise Continuum

L'entreprise danoise [Continuum](#), fondée en 2021 et implantée au Royaume-Uni ([Continuum Composite Transformation](#)) à Norwich (Norfolk), a développé et breveté une technologie de recyclage mécanique des pales d'éoliennes et des composites à l'échelle industrielle, revendiquée comme la plus avancée au monde. Continuum affirme avoir mis au point un processus de bout en bout, depuis la collecte des pales et déchets de fabrication et de production de composites, jusqu'à la production d'articles en matériaux composites recyclés (portes industrielles, plans de travail de cuisine, etc.). Continuum se présente d'ailleurs comme un fabricant de composites avec un contenu en matériaux recyclés jusqu'à 92 %.

Continuum prévoit la construction de six usines, une première à Esbjerg (Danemark), opérationnelle d'ici la fin 2024, puis d'une deuxième au Royaume-Uni, enfin de quatre autres (en France, Allemagne, Espagne et Turquie) d'ici 2030. Chaque usine aura la capacité de recycler plus de 36 000 tonnes de pales par an.

Continuum est soutenue par la société de capital-risque danoise Climentum Capital et a obtenu une subvention de l'Offshore Wind Growth Partnership (OWGP, Royaume-Uni).

Incinération en cimenteries

Outre le broyage mécanique, la méthode de coprocessing (valorisation mixte matière et énergétique) mise en œuvre dans les cimenteries dans les cimenteries (cf. Étape 1) est la solution la plus utilisée aujourd'hui. Elle a l'avantage de valoriser le pouvoir calorifique des résines et la matière des fibres de verre. Efficace et rapide, ce procédé doit néanmoins se faire à haute température et les gaz d'échappement doivent être traités. D'autre part, les propriétés mécaniques des fibres de verre sont perdues. Par ailleurs, ce procédé présente des limites, notamment en termes de volume (compétition avec d'autres filières) ainsi que du fait de risque d'obturation des filtres et des buses d'alimentation en gaz.

Pour mémoire (cf. Étape 1), cette [étude](#) de l'Ademe, se fondant sur cette [étude](#) de l'association [Amorce](#), fournit une liste des préparateurs de CSR à destination des cimenteries, ainsi qu'une liste de cimenteries françaises, établie en concertation avec le Syndicat français de l'industrie cimentière ([Sfic](#)) — le chapitre 5 de l'[étude](#) Ademe est entièrement consacré aux acteurs (en France mais aussi hors Hexagone) du traitement des déchets composites.

~~~

Pour rappel, le sujet du traitement des matériaux composites constitutifs des pales d'éoliennes est abordé dans ce [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. Étape 1, 1<sup>re</sup> partie, section Gisement des éoliennes en fin de vie, [Les parcs en fin de vie](#)). Selon les auteurs, et comme cela a été vu plus haut (cf. étape 1, 1<sup>re</sup> partie, section Technologies et procédés de recyclage et valorisation), deux technologies sont aujourd'hui principalement utilisées pour traiter les déchets composites des pales : la méthode de coprocessing dans l'industrie cimentière et le broyage mécanique fin. En se référant à la hiérarchie des déchets établie par la directive-cadre ([directive 2008/98/CE](#)) de l'Union européenne, le recyclage matière (en l'occurrence le broyage mécanique fin) des pales prime sur leur valorisation énergétique (en l'occurrence le coprocessing en cimenterie) — l'ultime solution, à éviter, étant la mise en décharge.

La partie du rapport du CGEDD/CGEJET consacrée à la R&D et innovation sur le recyclage des pales est intéressante mais la plupart des données qui y figurent ont bénéficié d'une mise à jour grâce à ce [guide](#) (rapport technique déjà cité plus haut) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec), publié par l'Ademe en mai 2022, qui présente les principales solutions techniques disponibles sur le marché pour le traitement, le recyclage et la valorisation des matériaux composites, ainsi que les innovations pour lesquelles des développements ont été identifiés à une échelle laboratoire ou préindustrielle.

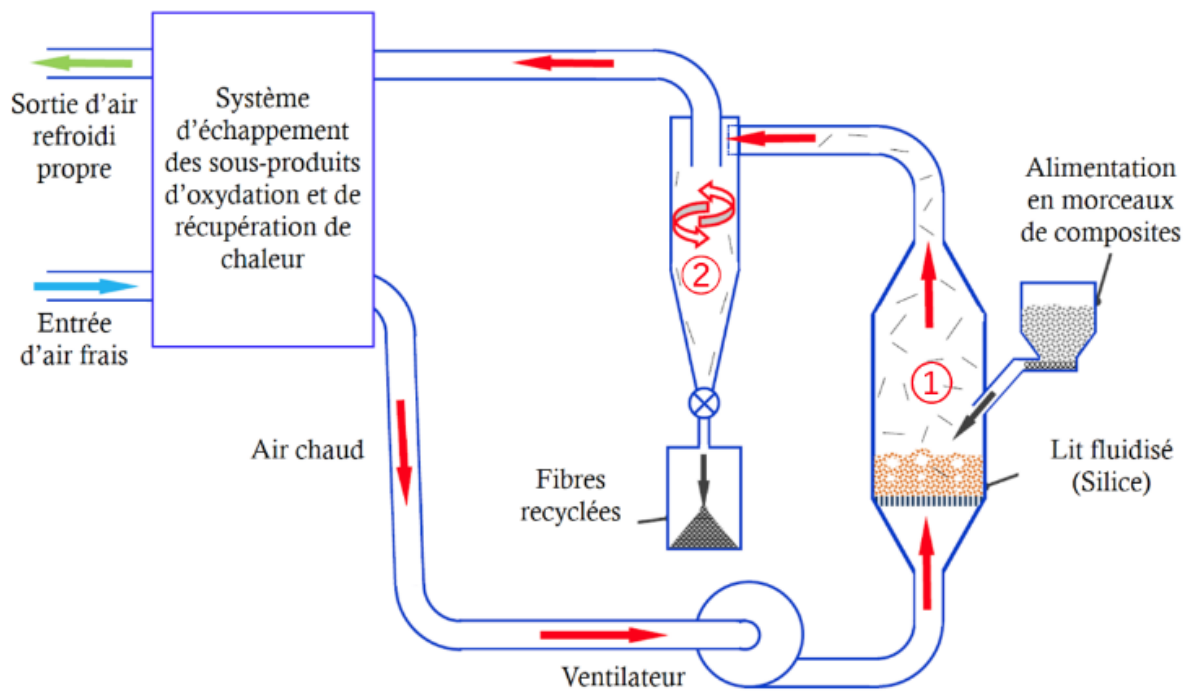
#### Gazéification par lit fluidisé (thermique)

La méthode de gazéification par lit fluidisé, qui permet un transfert de chaleur à haut rendement, est un processus hautement flexible. En revanche, les fibres de verre en sortie ont des qualités mécaniques dégradées. Cette technique n'est pas viable économiquement à ce jour.

Le recyclage par lit fluidisé est un procédé de combustion dédié spécifiquement au recyclage des composites à matrice organique.

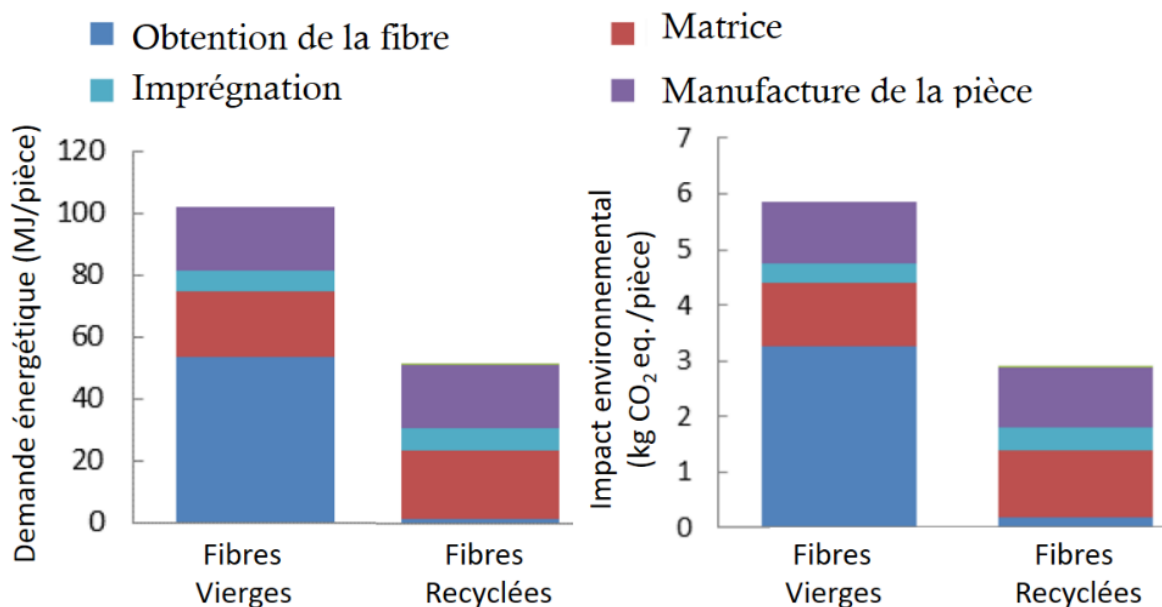
Dans ce procédé (cf. illustration ci-après), les pièces composites sont préalablement broyées afin d'obtenir des tailles de l'ordre de 25 mm. Un flux d'air chauffé à 500 °C est acheminé avec un débit allant de 0,4 à 1 mètre par seconde jusqu'à une première chambre de recyclage où se trouve le lit fluidisé — constitué de grains de silice (SiO<sub>2</sub>) de 0,85 mm. Les copeaux de composite à recycler sont introduits au-dessus du lit, suffisamment lentement pour que la matrice soit séparée des fibres. L'air chaud va ensuite acheminer les fractions légères, constituées de particules solides de matrice et de fibres vers le haut. Les polluants plus lourds, comme les métaux, sont piégés en raison de leur densité dans le lit de silice.

Les constituants légers sont acheminés par le flux d'air chaud vers une deuxième chambre où la température avoisine les 1 000 °C et permet l'oxydation complète des éléments de matrice par pyrolyse. Les fibres sont ainsi débarrassées de toute trace de résine. Le flux d'air chaud ascendant dans la chambre de pyrolyse produit un cyclone qui entraîne les gaz, sous-produits d'oxydation issus de la pyrolyse, vers le système d'échappement. Les fibres propres sont entraînées vers le bas pour être récupérées. Le système d'échappement permet la filtration de l'air sortant mais aussi la récupération de la chaleur contenue dans l'air, permettant d'optimiser la quantité d'énergie apportée au système.



Les différentes étapes du procédé de recyclage des composites par lit fluidisé (source : [Ademe](#), 2022).

À la sortie de la deuxième chambre, les fibres sont exemptes de toutes traces de matrices résiduelles. Le procédé permet l'élimination de toute contamination et constitue une bonne alternative aux méthodes actuellement utilisées comme la pyrolyse. Des auteurs ont montré que les composites en fibres recyclées selon cette voie consomment moins d'énergie et impactent moins le climat que l'utilisation de matière vierge — les gains portent principalement sur la production de fibres (cf. illustration ci-après).



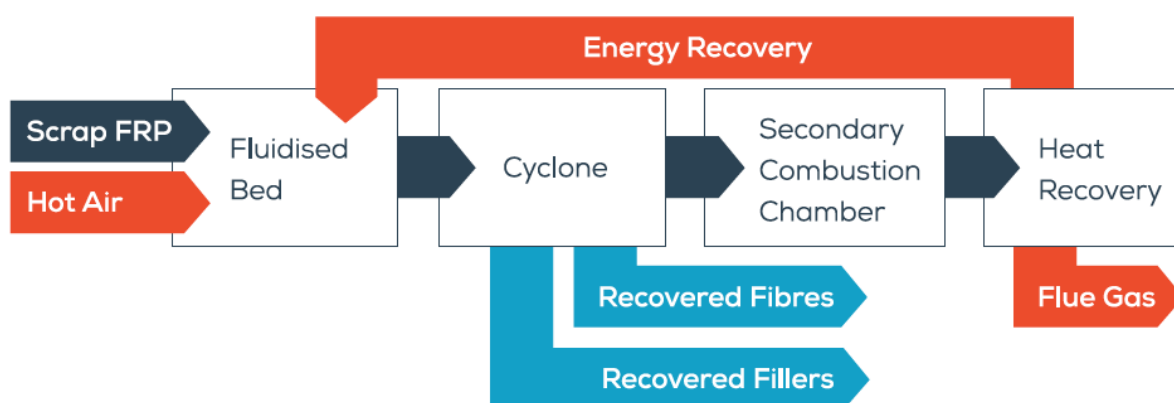
Demande énergétique et impact environnemental de composites à base de fibres de carbone vierges comparées à des composites à base de fibres de carbone recyclées (source : [Ademe](#), 2022).

Plusieurs obstacles demeurent avant l'essor de cette méthode. En premier lieu, la réduction des composites en copeaux de taille inférieure à 2,5 cm peut engendrer une diminution de la taille des fibres et, donc, une diminution significative des propriétés mécaniques du matériau recyclé. Par ailleurs, les fibres obtenues se présentent sous la forme de pelotes, aux longueurs aléatoires, ce qui

les prédétermine à être utilisées dans des composites à fibres non orientées. Les recherches actuelles portent essentiellement sur les fibres de carbone, qui conservent leurs propriétés mécaniques après le procédé, alors que les fibres de verre — quoique très peu étudiées — accusent une perte de 50 % de leurs propriétés mécaniques avec ce procédé (cf. illustration ci-après).

| Technologie                        | Résistance à la traction (MPa) | Module d'Young (GPa) | Longueur de fibre (mm) |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------|
| Composite vierge                   | 172                            | 20                   | 12                     |
| Composite recyclé par lit fluidisé | 150 (-13 %)                    | 17 (-15 %)           | 1,5                    |

Comparaison des propriétés mécaniques de composites à base de fibres de carbone vierge ou obtenues par recyclage sur lit fluidisé (source : [Ademe](#), 2022).



| TRL | STRENGTHS                                                                                                                                                                                     | DISADVANTAGES                                                                                            | POINTS OF ATTENTION                                                                                                                                                    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5/6 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• More tolerant of contamination</li> <li>• Recovery of energy or potential precursor chemicals</li> <li>• High efficiency of heat transfer</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• More degradation of fibres than solvolysis/pyrolysis</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Process-related emissions (although appropriate mitigation exists)</li> <li>• Scale-up still needs to be developed</li> </ul> |

Gazéification par lit fluidisé (source : [WindEurope](#), 2022).

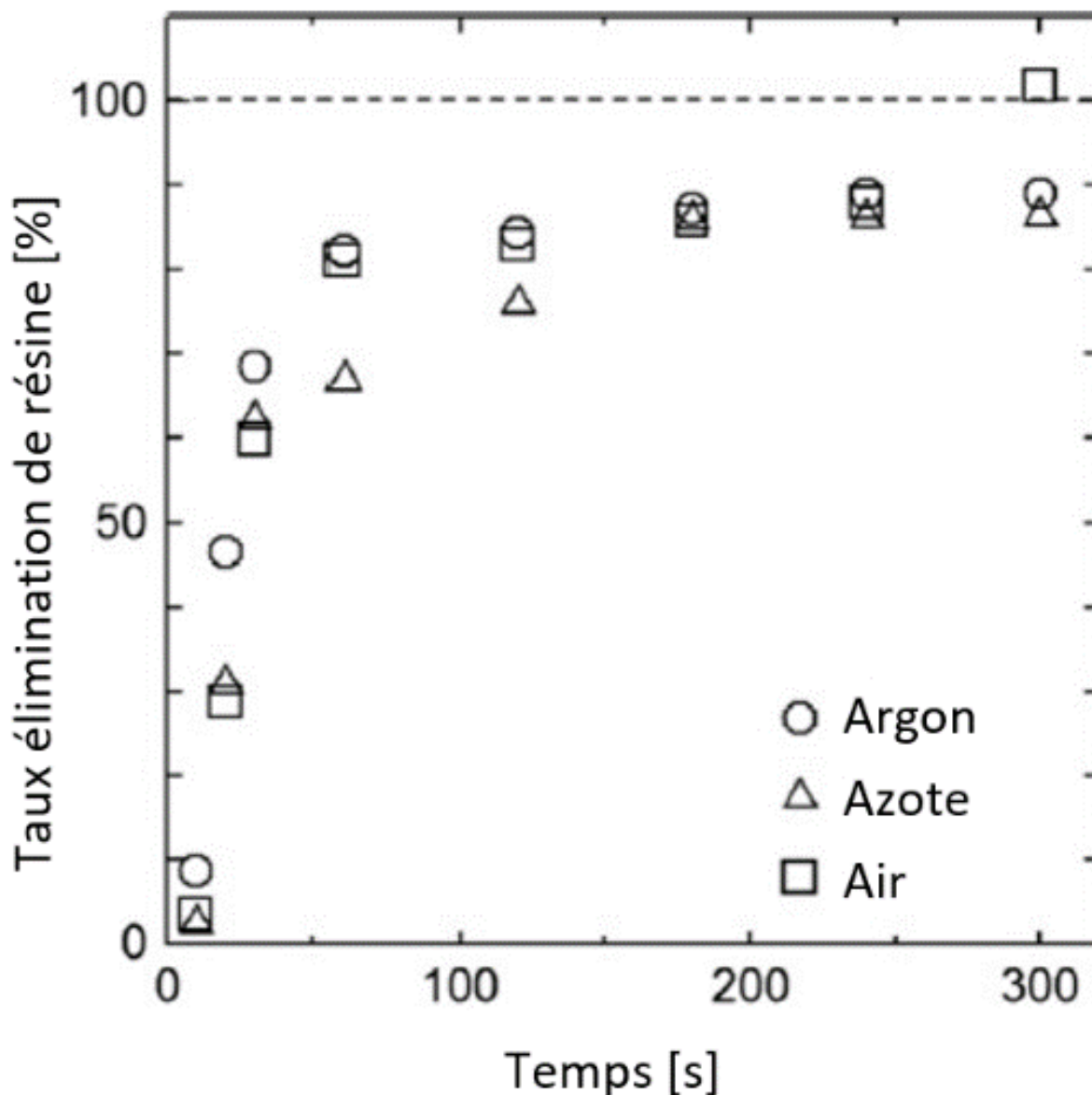
### Pyrolyse assistée par micro-ondes

La pyrolyse assistée par microondes — parfois dénommée chauffage par microondes — est un procédé thermique dans lequel le matériau composite est chauffé par des microondes pour séparer les fibres de la matrice. Ce procédé, apparenté à la pyrolyse, est effectué dans un four à microondes à des températures comprises entre 400 et 600 °C pendant une durée variable allant de quelques centaines de secondes à près de 30 minutes. Les fréquences appliquées aux matériaux sont comprises entre 915 MHz et 2,45 GHz. Lors du traitement, les microondes créent un champ magnétique, induisant des courants de Foucault dans la matière : cette activité électrique génère une montée en température par effet Joule. Cette technologie permet un chauffage rapide et à cœur du matériau. En raison de ces températures élevées, la matrice se dégrade, libérant les fibres de carbone.

À noter que les rayonnements microondes sont adaptés aux matériaux présentant une conductivité électrique élevée. C'est pourquoi ce traitement est particulièrement efficace pour des fibres de carbone (conductivité électrique d'environ  $10^5$  siemens/m à 25 °C) et inefficace pour les fibres de verre (conductivité électrique d'environ  $10^{-13}$  S/m à 25 °C). À titre de comparaison, la conductivité

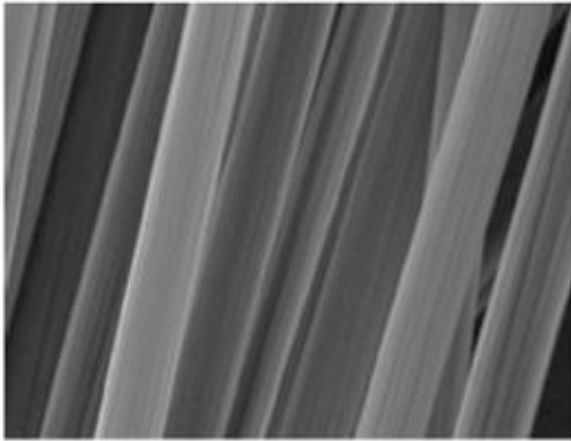
électrique de l'argent — le métal le plus conducteur — est de  $63.10^6$  S/m et celle du cuivre de  $60.10^6$  S/m.

Il a été montré que l'atmosphère de pyrolyse joue sur la qualité du recyclage. Des chercheurs ont ainsi étudié l'impact de l'atmosphère (air, azote et argon) de traitement sur le taux de résidu de résine sur les fibres (cf. illustration ci-après). Le taux d'élimination de la résine époxy en fonction du temps d'irradiation et sous différentes atmosphères augmente rapidement (environ 60 s d'irradiation), puis le taux d'élimination de la résine reste quasi constant (environ 90 %). Mais sous atmosphère air, le taux d'élimination de la résine augmente jusqu'à 100 %, suggérant que la combustion de la résine gazeifiée est totale en raison de la température élevée et en présence d'oxygène.

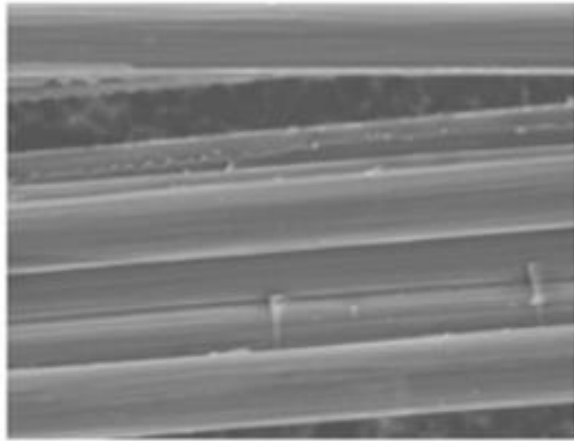


Taux d'élimination de la résine en fonction du temps de radiation sous trois atmosphères différentes (source : [Ademe](#), 2022).

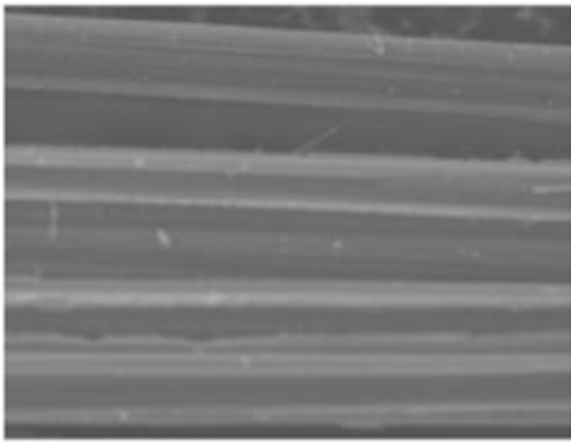
L'examen en microscopie électronique à balayage des fibres de carbone traitées par microondes pendant 300 s sous différentes atmosphères, ainsi que l'examen de fibres de carbone vierges pour comparaison, montre que les fibres de carbone ont des surfaces lisses avec peu de résidus de résine sous atmosphère d'azote ou d'argon. Mais des défauts apparaissent sur les fibres de carbone après irradiation en présence d'air, indiquant que la combustion complète de la matrice thermodurcissable altère la structure des fibres recyclées et entraîne une diminution de leur qualité (cf. illustration ci-après).



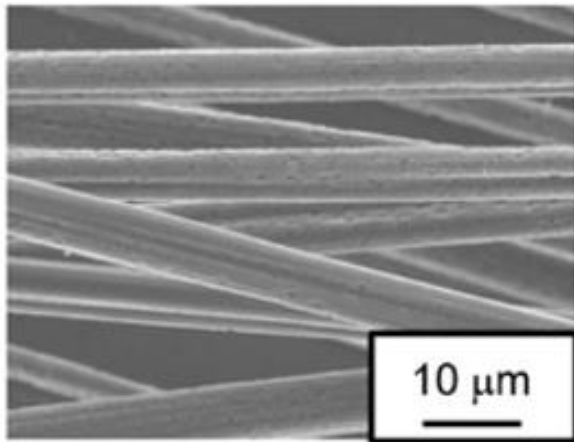
a) Vierge



b) Argon



c) Azote



d) Air

Observation par microscopie électronique à balayage de fibres de carbone traitées sous trois atmosphères différentes (source : [Ademe](#), 2022).

Des auteurs ont soumis un composite à base de résine époxy et de fibres de carbone à ce type de traitement par microondes à 2,94 MHz sous atmosphère inerte (azote), puis ont réalisé des tests de traction avec les fibres résiduelles afin de les comparer au procédé de recyclage par lit fluidisé. De façon encourageante, les fibres traitées par microondes conservent une résistance à l'allongement légèrement supérieure (3,26 GPa pour le chauffage micro-ondes contre 3,05 GPa pour le traitement en lit fluidisé). Mais on constate que le module d'Young (module d'élasticité ou de traction) des échantillons chauffés aux microondes est légèrement réduit par rapport aux échantillons vierges ou à des échantillons issus du traitement par lit fluidisé, indiquant des températures trop élevées et/ou inadaptées lors du traitement par microonde, ce procédé nécessitant encore des ajustements pour augmenter son efficacité (cf. illustration ci-après).

|                      | Fibres vierges      |                        | Fibres recyclées |              |
|----------------------|---------------------|------------------------|------------------|--------------|
|                      | Données fournisseur | Données expérimentales | Lit fluidisé     | Micro-ondes  |
| Résistance max (GPa) | 4,50                | 4,09                   | 3,05 (-25 %)     | 3,26 (-20 %) |
| Module d'Young (GPa) | 234                 | 242                    | 243 (0 %)        | 210 (-13 %)  |

Comparaison des propriétés mécaniques de fibres de carbone recyclées issues de composites à base de résine époxy et de fibres de carbone selon deux procédés de recyclage (microondes, lit fluidisé) avec des fibres de carbone vierges (source : [Ademe](#), 2022).

Les auteurs de cette étude concluent sur la faisabilité du recyclage des matériaux composites fibreux (carbone) à matrice therm durcissable par microondes, bien que les paramètres du procédé restent à optimiser (temps d'irradiation optimal, contrôle de la température du matériau pendant le processus). À ce jour, aucune société exploitant cette technologie n'est identifiée.

#### Courants électriques pulsés (électrique)

La fragmentation à haute tension — processus électromécanique — est traditionnellement utilisée pour des applications minières et ce depuis les années 1960. L'objectif de ce procédé est de désagréger les roches en constituants individuels afin de séparer et récupérer les fractions à haute valeur, telles que les minéraux et les cristaux. Le générateur utilise des décharges électriques à impulsions répétitives dans un environnement liquide conducteur — couramment de l'eau — pour désintégrer la matière solide. Les impulsions sont déchargées dans une période de temps très courte et entre deux électrodes. Le matériau solide est maintenu dans l'écart entre les électrodes. Lors de l'application de hautes tensions (100 à 200 kV) à un temps de montée d'impulsion inférieur à 500 nanosecondes, cette puissance restituée se transforme en une énergie mécanique sous forme d'onde de choc intense à haute pression (supérieure à  $10^9$  Pa) et une température élevée (supérieure à  $10^4$  K) induisant des contraintes mécaniques internes qui dépassent la résistance à la traction des matériaux solides, permettant la séparation de ses constituants. Cela conduit finalement à une désintégration partielle du matériau (cf. illustration ci-après).

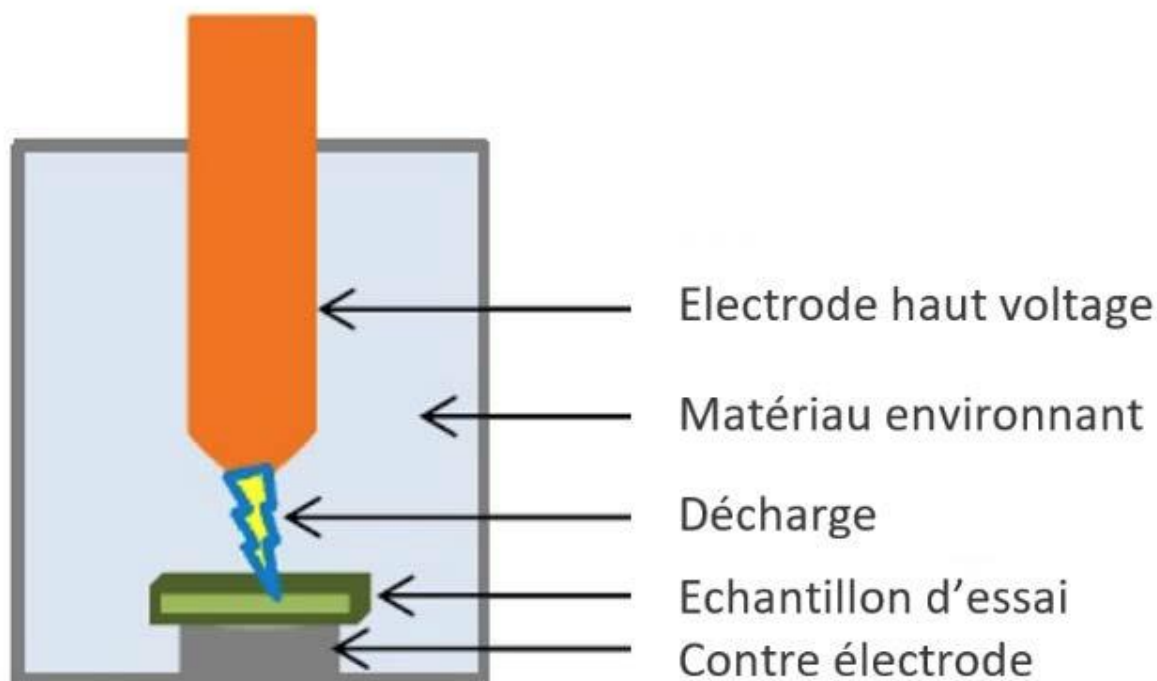


Schéma de fonctionnement du procédé de fragmentation à haute tension (source : [Ademe](#), 2022).

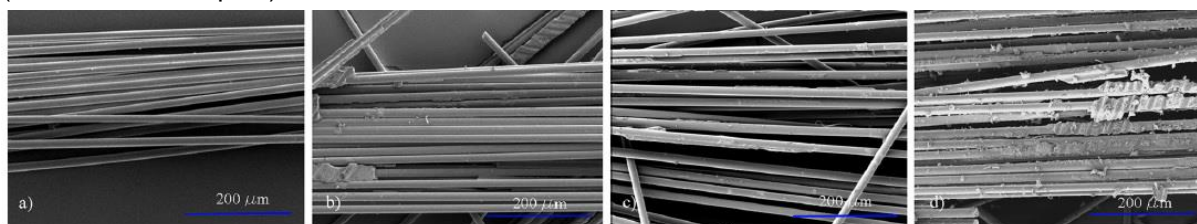
En 2014, des chercheurs ont adapté ce procédé aux matériaux composites therm durcissables chargés en fibre de verre afin d'observer son impact sur les propriétés mécaniques des fibres (module d'Young et résistance maximale), en vue d'adapter ce procédé au recyclage de la fraction fibreuse des matériaux composites. Des panneaux composites à base de résine époxy et de fibres de verre réalisés en SMC (Sheet Molding Compound — pré imprégné en feuille) ont ainsi été soumis à cette technique de fragmentation à haute tension ainsi qu'au processus de broyage mécanique pour comparaison. Des tests micromécaniques ont ensuite été effectués pour comparer les propriétés des fibres obtenues avec ces deux procédés de recyclage. Les résultats montrent que les fibres obtenues lors du processus de fragmentation à haute tension possèdent des propriétés mécaniques

supérieures à celles recyclées mécaniquement — mais qui restent toutefois inférieures à celles des fibres vierges (cf. illustration ci-après).

| Fibre                      | Résistance max (GPa) | Module d'Young (GPa) | Elongation à la rupture (%) | Diamètre ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Vierge                     | $2,14 \pm 0,81$      | $63,48 \pm 26,68$    | $6,73 \pm 2,81$             | $15,91 \pm 1,73$           |
| Fragmentation Haut Voltage | $1,89 \pm 0,53$      | $55,65 \pm 15,83$    | $3,98 \pm 1,67$             | $15,57 \pm 1,09$           |
| Recyclage mécanique        | $1,73 \pm 0,66$      | $39,1 \pm 17,78$     | $3,96 \pm 1,75$             | $15,58 \pm 1,68$           |

Propriétés mécaniques et diamètres comparés des fibres vierges et recyclées par le procédé de fragmentation à haute tension et le procédé mécanique (source : [Ademe](#), 2022).

D'autres chercheurs ont également appliqué ce procédé à des matériaux composites thermodurcissables (polyester insaturé) à base de fibres de carbone (30 %), en comparaison avec les procédés de recyclage mécanique existants. Les résultats montrent un taux résiduel de résine, pour le procédé de fragmentation à haute tension, inférieur à celui obtenu par recyclage mécanique. En outre, la teneur en résine résiduelle dans le procédé de fragmentation à haute tension dépend du nombre d'impulsions électriques appliquées : le résidu de résine est d'autant plus faible que le nombre de ces impulsions est élevé. Par ailleurs, le procédé de fragmentation à haute tension génère des fibres dont la longueur moyenne et la qualité de surface sont supérieures comparées au recyclage mécanique (cf. illustration ci-après).

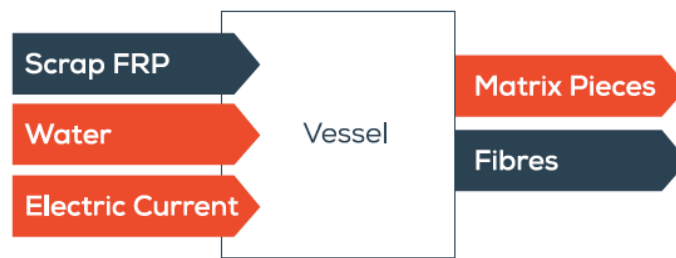


(a) Fibres vierges, (b) fibres traitées à 500 impulsions en 500 ns, (c) fibres traitées à 2 000 impulsions en 500 ns, (d) fibres traitées mécaniquement (source : [Ademe](#), 2022).

Si le procédé de fragmentation à haute tension possède des avantages indéniables quant à la qualité et propriétés mécaniques des fibres issues du recyclage, l'industrialisation du procédé reste difficile notamment en raison de l'importante quantité d'énergie nécessaire pour détruire, via les impulsions de l'électrode, le réseau tridimensionnel des résines thermodurcissables. Une étude de l'impact environnemental des différents procédés de recyclage des matériaux composites montre en effet que le procédé de fragmentation à haute tension consomme environ 20 MJ/kg de fibres recyclées contre environ 1 MJ/kg pour le procédé de recyclage mécanique. Des chiffres à comparer à l'énergie nécessaire à la production de fibres vierges : la production de fibres de carbone consomme de 183 à 286 MJ/kg et celle de fibre de verres entre 13 et 32 MJ/kg.

La startup française [Xcrusher](#) — soutenue notamment par l'Ademe — a développé un procédé par fragmentation à haute tension qui a atteint une maturité industrielle dans plusieurs applications telles que le recyclage de composites thermodurcissables ou de films multicouches.

À cet égard, il convient de mentionner le projet [RCC](#) (Recyclage Composites Carbone), un projet accompagné financièrement par l'Ademe (P. I. A.) et lancé en avril 2016 pour une durée de 4 ans, visant à mettre au point une méthode de recyclage de déchets composites à base de fibres de carbone par l'utilisation de la technologie à puissances pulsées — projet coordonné par Suez en partenariat avec Xcrusher.



| TRL | STRENGTHS                                                                                                                                                          | DISADVANTAGES                                                                                                                                                                              | POINTS OF ATTENTION                                                                                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Potential to be scalable to treat large amounts of waste</li> <li>Low investments required to reach the next TRL</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Only laboratory- and pilot-scale equipment are available</li> <li>Decreased quality of the recovered glass fibres from original material</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Size of the available installations might be suboptimal to recycle the current stock of wind turbine</li> </ul> |

Fragmentation par impulsions haute tension (source : [WindEurope](#), 2020).

### Pyrolyse (thermique)

Le traitement thermique (pyrolyse) a fait précédemment l'objet d'un développement (cf. Étape 1, 2<sup>e</sup> partie, section Technologies et procédés de recyclage et valorisation, [Recyclage chimique par pyrolyse](#)).

Pour rappel, le procédé de pyrolyse permet de rompre les jonctions entre les fibres et les résines grâce à travers un chauffage sans oxygène. Prometteur pour les fibres de carbone, ce procédé n'est pas approprié pour les fibres de verre qui sont mécaniquement dégradées. Une alternative utilisant un chauffage par micro-ondes permet un meilleur contrôle de la chauffe et une dégradation limitée des fibres (cf. supra).

À propos des fibres de carbone, l'une des innovations pouvant justifier d'adopter une approche d'« upcycling » (retour à une matière équivalente suivant un recyclage « par le haut », en boucle fermée, à plus forte valeur ajoutée) est la part grandissante de ces fibres dans la composition des pales. Mais les fibres de carbone restent coûteuses par rapport aux fibres de verre, leur prix oscillant entre 15 et 25 €/kg, contre 2 €/kg — selon ce [guide](#) (déjà cité plus haut) Grec publié par l'Ademe en 2022. Selon un rapport réalisé par la fédération allemande des plastiques renforcés [AVK](#) (Arbeitsgemeinschaft / Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe), de 33 000 tonnes en 2010, puis 58 000 tonnes en 2015, la demande mondiale en fibre de carbone est passée à 78 500 tonnes en 2018, dépassant les 120 500 tonnes en 2022. Et la demande devrait encore s'accroître si le prix descendait à 10 €/kg.

À ce stade, il convient de faire une distinction entre différentes modalités de pyrolyse. On [distingue](#) ainsi :

- la pyrolyse conventionnelle (ou lente), généralement réalisée à des températures comprises entre 550 et 950 K, avec des vitesses de chauffage comprises entre 0,1 et 1 K/s ;
- la pyrolyse rapide, généralement réalisée à des températures comprises entre 850 et 1 250 K, avec des vitesses de chauffage comprises entre 10 et 200 K/s ;
- la pyrolyse flash, généralement réalisée à des températures comprises entre 1 050 et 1 300 K, avec des vitesses de chauffage supérieures à 1 000 K/s.

### Zoom sur l'entreprise Carbon Rivers

Avec le soutien financier de l'U.S. Department of Energy (U.S. DoE), l'entreprise américaine [Carbon Rivers](#) (Knoxville, Tennessee) développe une technologie de recyclage de fibres de verre issues de pales d'éoliennes en fin de vie, selon un procédé thermique (pyrolyse) qui permet de récupérer les fibres de verre présentant un degré de pureté élevé (de l'ordre de 99,9 %) et mécaniquement intactes (laissant envisager un recyclage en boucle fermée — nouvelles pales d'éoliennes).

Les fibres de verre recyclées, séparées des produits de la pyrolyse (syngas, huile de pyrolyse, etc.), sont nettoyées et collectées en vue de leur réutilisation (en boucle fermée) dans la fabrication de nouveaux produits (cf. illustration ci-après).



Mats et voiles issus de fibres de verre recyclées (source : [Carbon Rivers](#), 2023).

Selon cet [article](#) du 17 octobre 2022 de l'U.S. DoE (Wind Energy Technologies Office, relevant de l'Office of Energy Efficiency & Renewable Energy), Carbon Rivers serait en train de séparer une partie de ses activités en une entité autonome appelée Windfall Inc. qui développera la première installation de recyclage de fibres de verre à grande échelle aux États-Unis, à Knoxville.

Carbon Rivers a recyclé quelques milliers de tonnes et renforce la capacité de sa nouvelle installation pour traiter plus de 50 000 t/an — soit plus de 7 000 pales d'éoliennes en fibre de verre, selon la taille et le modèle.

Ces résultats sont le fruit d'une collaboration avec l'université du Tennessee (Knoxville) pour développer une technologie (pyrolyse) de recyclage à grande échelle des pales d'éoliennes en de nouveaux matériaux composites. Le procédé permet de récupérer les fibres de verre tout en limitant leur dégradation mécanique, de sorte que les fibres recyclées peuvent être réutilisées dans de nouvelles applications (véhicules, systèmes d'énergies renouvelables, équipements sportifs, etc.). La start-up Carbon Rivers développe et commercialise aujourd'hui la technologie.

Par ailleurs, TPI Composites ([TPI](#), Scottsdale, Arizona) s'est associée à [Tex-Tech](#) (Kernersville, Caroline du Nord) et Carbon Rivers dans le cadre d'un programme pilote visant à traiter les pales d'éoliennes en fin de vie, à pyrolyser le matériau et à transformer la fibre de verre récupérée en vue de sa réutilisation dans des travaux de chemisage durci sur place selon le procédé CIPP (Cured In Place Pipe) de canalisations (eau, évacuation) endommagées (cf. ce [CP](#) de TPI Composites du 8 mars 2023). Dans le cadre de ce partenariat, TPI Composites fournit des pales d'éoliennes en fin de vie à Carbon Rivers qui a créé une ligne pilote pour le traitement par pyrolyse de ces pales, produisant des hydrocarbures légers ainsi que des fibres de verre, intégrées par Tex-Tech comme renfort dans des liners non tissés utilisés lors des opérations CIPP.

### Zoom sur le TNO

Aux Pays-Bas, ce [CP](#) du TNO du 17 octobre 2022 mentionne une collaboration entre l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) et le [Brightlands Materials Center](#) autour d'un procédé de recyclage thermochimique par pyrolyse, au cours duquel les matériaux de pales sont chauffés à 500 °C en absence d'oxygène, libérant les fibres de carbone ou de verre qui, une fois extraites, sont réutilisables dans de nouveaux produits finis ou semi-finis en composites thermoplastiques (pièces automobiles, articles de sport, mobilier, emballages, électroniques, etc.) plus faciles à recycler que les thermosettableurs.

La méthode est adaptée d'une technologie développée par le TNO pour produire du biochar (amendement de sol fabriqué à partir de biomasse par pyrolyse) — usine pilote produisant du biochar à l'échelle semi-industrielle.

Il s'agit d'un processus de downcycling dans lequel on retarde l'incinération des déchets ultimes, selon l'expert [Harald van der Mijle Meijer](#), ingénieur en matériaux, responsable R&D éolien offshore.

### Zoom sur la pyrolyse par plasma

Récemment (avril 2023), des chercheurs du Plasma Processing Laboratory au Lithuanian Energy Institute (Lituanie) ont [rapporté](#) une méthode de recyclage des pales d'éoliennes en microfibre grâce à la pyrolyse par plasma.

Les résultats de ces travaux de recherche montrent que la fibre formée à partir de la poudre obtenue à partir des pales d'éoliennes broyées est suffisamment propre et respectueuse de l'environnement, de sorte qu'elle pourrait être largement utilisée comme matière première pour la production d'isolation thermique, dans la production de catalyseurs, ou comme composant du béton, du ciment ou de l'asphalte et dans d'autres industries.

### Zoom sur la vapopyrolyse ou vapo-thermolyse (thermique)

La pyrolyse à la vapeur (steam pyrolysis — cf. cette [étude](#) de l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#)) — est un procédé énergivore au TRL 4 qui produit des fibres de carbone de haute qualité (plus de 90 % de rétention des propriétés mécaniques) mais seulement à très petite échelle à ce jour.

À consulter sur le sujet, cette [thèse](#) de 2015 sur le recyclage des composites à base de fibres de carbone par vapo-thermolyse — procédé combinant la pyrolyse et la vapeur d'eau surchauffée à pression ambiante afin de décomposer la matrice organique du composite. Dans ces travaux, les fibres récupérées selon des conditions opératoires optimales étaient propres, régulières et similaires aux fibres neuves, conservant plus de 80 % de leur résistance à la traction initiale. Par ailleurs, une analyse du cycle de vie, comparant les impacts environnementaux d'un scénario sans recyclage des composites et un autre avec recyclage par le procédé de vapo-thermolyse, montrait que la valorisation des composites par récupération des fibres de carbone apporte un net avantage environnemental

Il s'agit d'un procédé assez nouveau pour le traitement des matériaux composites, qui se situe encore actuellement à un faible niveau de maturité technologique (TRL 4). Cet [article](#) de 2015 par la société toulousaine [Alpha Recyclage Composites](#) discute de la nature de la technologie avec quelques premiers résultats prometteurs. Le processus utilisait de la vapeur surchauffée pour éliminer la résine époxy (Hexcel HexFlow RTM-6) des fibres de carbone. Il a été possible d'éliminer des niveaux élevés de résine (plus de 99 % en poids) sans aucun changement significatif dans la qualité de la fibre de carbone récupérée.

De plus, les fibres présentaient des signes minimes de dégradation de surface par rapport à celles récupérées par pyrolyse traditionnelle, comme l'indiquait l'absence d'effet de piqûre qu'on observe sur les fibres récupérées à l'aide de la méthode traditionnelle de pyrolyse.

Les comparaisons des propriétés mécaniques entre les fibres vierges et celles récupérées par pyrolyse à la vapeur ont également donné des résultats prometteurs. Les valeurs de résistance à la traction et de module d'élasticité sont comparables entre les deux, avec une résistance à la traction de 136 MPa (par rapport à 141 MPa pour les fibres vierges) et un module d'élasticité de 8,4 GPa (par rapport à 8,9 GPa pour les fibres vierges). Cependant, les auteurs reconnaissent que davantage de tests sont nécessaires pour valider ces résultats initialement prometteurs, en plus des études de

faisabilité industrielle. L'effet de ce processus sur les fibres de verre est actuellement inconnu et nécessite des recherches.

Alpha Recyclage Composites dispose depuis 2019 d'un pilote de traitement préindustriel par vapothermolyse (procédé combinant pyrolyse et vapeur d'eau surchauffée) dont la capacité de traitement avoisine les 450 tonnes de matériaux composites à base de fibres de carbone de carbone recyclées par an.

### Solvolyse (chimique)

Le recyclage chimique (solvolyse) a fait précédemment l'objet d'un développement (cf. Étape 1, 2<sup>e</sup> partie, section Technologies et procédés de recyclage et valorisation, **Recyclage chimique par solvolyse**).

Utilisant de grandes quantités de solvant et d'eau, la solvolyse dissout les résines et permet de récupérer non seulement les fibres mais également les polymères et oligomères constituant la résine.

Bien qu'encore considéré aujourd'hui comme un procédé non mature pour un passage à l'échelle industrielle, la solvolyse est mise en œuvre par l'entreprise [Extracthive](#), basée à Sorgues (Vaucluse, Provence-Alpes-Côte d'Azur), qui propose un procédé de vaposolvolyse permettant de traiter annuellement de l'ordre de 400 tonnes de matériaux composites à base de fibres de carbone.

### **Solvolyse hautes ou basses température et pression**

Selon les conditions opératoires mises en œuvre (pression, température), on distingue la solvolyse à haute température et haute pression, de la solvolyse à basse température et à basse pression — cf. cette [étude](#) de l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#)).

Actuellement au TRL 4, la solvolyse à haute température et haute pression présente un coût élevé associé et une disponibilité limitée. Le procédé produit certes des fibres de carbone propres et de bonne qualité mais les inconvénients sous l'angle environnemental et du point de vue de la sécurité sont la forte intensité énergétique et la nature corrosive à haute pression de la méthode.

La solvolyse à haute pression utilisant des fluides supercritiques a été étudiée à l'échelle académique (Technology Readiness Level 4). Les fluides supercritiques présentent des propriétés intermédiaires entre celles des gaz et des liquides. Ils offrent une gamme de propriétés avantageuses qui permettent de contrôler étroitement les propriétés du solvant et les vitesses de réaction en ajustant la pression. L'eau est une option intéressante en raison de ses propriétés qui dépendent de la température et de la pression. Selon les conditions, l'eau est à l'origine de réactions ioniques, polaires non ioniques ou radicalaires, et peut être considérée comme un solvant modulable.

Dans des conditions supercritiques, les résines thermodurcissables (époxy) et thermoplastiques (PEEK — PolyEther Ether Ketone) les plus stables peuvent être entièrement dégradées à l'aide de solvants tels que l'eau, le méthanol, l'éthanol, le propanol et l'acétone sans avoir recours à des catalyseurs supplémentaires. Cela nécessite cependant des réacteurs spécifiques et coûteux, capables d'atteindre des pressions élevées et une résistance à la corrosion. Il s'agit d'un facteur limitant son utilisation à grande échelle, en particulier pour les matériaux de moindre valeur tels que la fibre de verre, mais il a été rapporté qu'elle produisait des fibres de carbone propres et de bonne qualité.

Également au TRL 4, la solvolyse à basse température et à basse pression produit des monomères de fibre de carbone et d'époxy propres et de bonne qualité. Le procédé est moins gourmand en énergie que le précédent mais implique l'utilisation d'acides dont il est difficile de se débarrasser de manière durable.

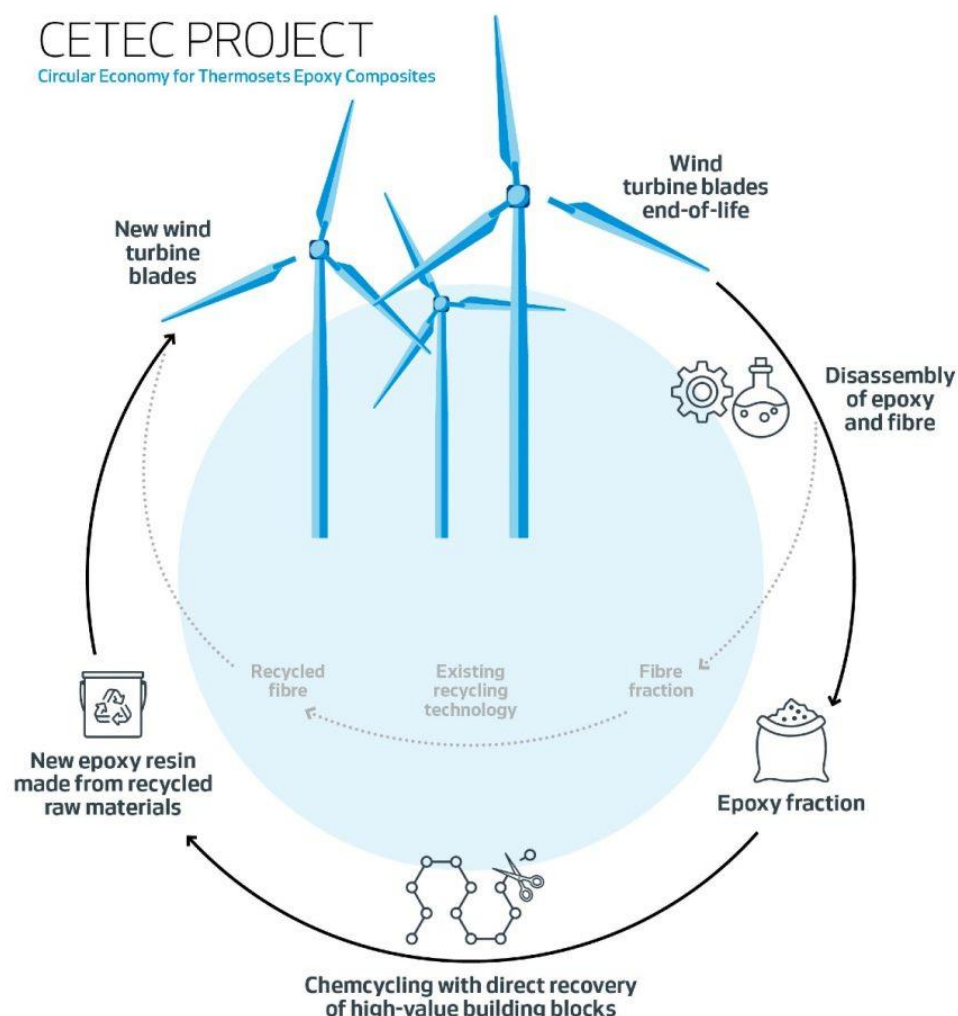
La solvolyse à basse température et basse pression est généralement réalisée en dessous de 200°C et à pression atmosphérique. Des catalyseurs et des additifs sont nécessaires pour dégrader la résine car la température est très basse et une agitation peut également être nécessaire. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle offre un meilleur contrôle des réactions et que, comme la température est basse, des réactions secondaires ne semblent pas se produire. Cela permet une récupération plus élevée des monomères époxy, mais pas nécessairement de l'agent de durcissement<sup>90</sup>. Il est donc également susceptible de consommer moins d'énergie que les autres procédés de solvolyse. Cependant, des acides sont utilisés dans le processus, qui peuvent être

dangereux et difficiles à éliminer ou à recycler<sup>90</sup>. Ce processus n'a été démontré qu'à l'échelle académique et correspond donc au niveau de maturité technologique 4.

### Zoom sur le projet CETEC

Le 8 février 2023, le fabricant d'éoliennes danois Vestas a [annoncé](#) avoir développé et mis au point, dans le cadre du projet de recherche danois CETEC (cf. ci-après) et en partenariat avec [Stena Recycling](#) et le fabricant d'époxy [Olin Corporation](#) (Clayton, Missouri, États-Unis) un procédé chimique de « chemcycling » (tenu secret — on apprend seulement que le « processus chimique met en œuvre des produits largement disponibles ») pour le recyclage des pales d'éoliennes à base de résine époxy, sans qu'il soit nécessaire de modifier la conception ou la composition des matériaux composites qui les constituent — solution applicable aux pales actuellement en service — générant des matériaux de qualité comparables aux matériaux vierges, réutilisables pour fabriquer de nouvelles pales d'éoliennes. Une annonce qui contredirait — selon les auteurs — le [point de vue](#) généralement admis selon lequel une nouvelle approche de la conception et de la fabrication est nécessaire pour le recyclage des pales.

Le 17 mai 2021, associée au leader de la résine époxy Olin Corporation, à l'université technique du Danemark [DTU](#) (Danmarks Tekniske Universitet) et à l'université d'Aarhus ([Aarhus Universitet](#)), Vestas Wind Systems avait [annoncé](#) le lancement du programme [CETEC](#) (Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites — « Économie circulaire pour les composites époxy thermodurcissables »), destiné à mettre au point une technique pour séparer les matériaux constitutifs des pales d'éoliennes actuellement en usage partout dans le monde (cf. illustration ci-après).



Projet CETEC (source : Vestas, 2023).

La finalité du projet CETEC — financé en partie par Innovation Fund Denmark — est de transformer les molécules d'époxy usagées en résines vierges, prêtes à intégrer de nouvelles pales, les fibres de verre ou de carbone pouvant être valorisées dans des filières de recyclage existantes.

Développée par [DreamWind](#), un projet de recherche piloté par les partenaires cités ci-avant, la nouvelle technologie consiste en un processus en deux étapes : les composites thermodurcissables sont d'abord désassemblés en fibre et en époxy puis, grâce à un nouveau processus de recyclage chimique (chemcycling), la résine époxy (chaînes polymères) est décomposée en blocs de base (building blocks) similaires aux matériaux vierges, qui peuvent être réintroduits dans la fabrication de nouvelles pales (nouvelle résine époxy dotée des mêmes qualités que le matériau d'origine).

Une fois développée, la solution s'adressera à d'autres industries utilisatrices de composites thermodurcissables (automobile, aviation, etc.). Le consortium indiquait viser une industrialisation en 3 ans (soit horizon 2024).

## Synthèse

|              | RECYCLING TECHNOLOGY             | TYPE               | MATURITY LEVEL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL) | COST                              |
|--------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|
| GLASS FIBRE  | Cement co-processing             | Thermal            | 9                                           | Low                               |
|              | Mechanical grinding              | Mechanical         | 9                                           | Low                               |
|              | High Voltage Pulse Fragmentation | Electro-mechanical | 6                                           | High investment and running costs |
| CARBON FIBRE | Pyrolysis & Microwave Pyrolysis  | Thermal            | Pyrolysis: 9<br>Microwave pyrolysis: 4/5    | High investment and running costs |
|              | Solvolytic                       | Chemical           | 5/6                                         | High investment and running costs |
|              | Fluidised Bed                    | Thermal            | 5/6                                         | High investment and running costs |

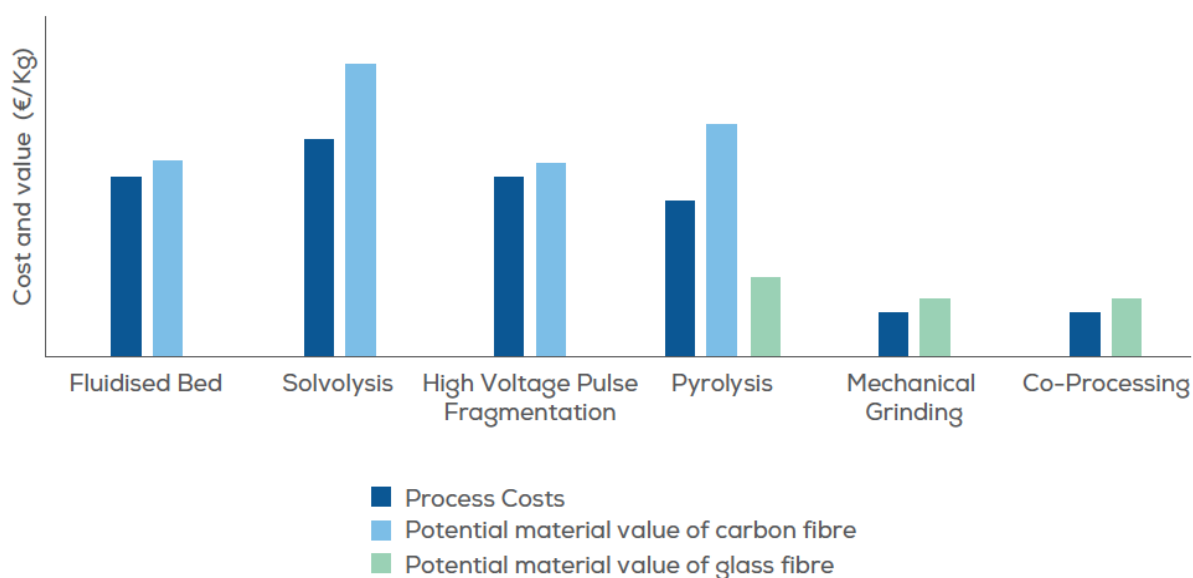
Comparaison des solutions de recyclage et de valorisation (source : [WindEurope](#), 2020).

À consulter également, cette [synthèse](#) réalisée par la plate-forme européenne de technologie et d'innovation pour l'énergie éolienne [ETIPWind](#) (European Technology and Innovation Platform on Wind Energy) sur les technologies de recyclage des composites et le niveau de maturité technologique TRL (Technology Readiness Level), ainsi que cette [étude](#) (mars 2021, phase 1) de l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#)) — également disponible [ici](#), ainsi qu'une [synthèse](#) du rapport.

La [phase 2](#) (2021) de cette étude a développé une méthodologie permettant de classer diverses techniques de recyclage des composites à base de fibres de verre ou de carbone en fonction de valeurs environnementales, techniques, économiques et sociétales. Une analyse multicritère a été réalisée sur la base de facteurs tels que les émissions de gaz à effet de serre, les conditions du processus, les résultats du processus, la facilité de réutilisation, l'impact environnemental, la rentabilité et les opportunités de la chaîne d'approvisionnement. Les résultats montrent que la technique de pyrolyse se classe au premier rang pour les composites à base de fibres de carbone, produisant une fibre recyclée de bonne qualité à un coût raisonnable et avec un impact environnemental moindre. Compte tenu du faible coût de la fibre de verre, la technologie la plus adaptée actuellement est le broyage. Même s'il endommage les fibres, c'est le moins coûteux et le moins impactant sur l'environnement (cf. illustration ci-après).

| Ranking | CFRP                         | GFRP                      |
|---------|------------------------------|---------------------------|
| 1       | Pyrolysis                    | Grinding                  |
| 2       | Grinding                     | Cement kiln co-processing |
| 3       | Mircowave assisted pyrolysis | Pyrolysis                 |

Classement des technologies (source : [phase 2](#) de l'étude citée, 2021).



Estimation des coûts et de la valorisation des technologies de recyclage des composites (source : [WindEurope](#), 2020).

### Programmes européens

À noter qu'à l'échelon Europe, le Joint Industry Project (JIP) Eucia-Cefic-WindEurope a donné lieu à cette [étude](#) (déjà citée plus haut, à l'étape 1) publiée en mai 2020 conjointement par le Cefic, l'EuCIA et WindEurope.

En matière de recherche, il convient de mentionner les projets conduits dans le cadre d'Horizon Europe et d'Horizon 2020.

### Horizon Europe

Le portail des offres et financements « [Funding & Tenders portal](#) » est le portail unique pour les participants à de nombreux programmes de financement de la Commission européenne, dont Horizon Europe — programme de financement européen dédié à la recherche et à l'innovation pour la période 2021-2027, qui succède au programme Horizon 2020. Ce portail permet notamment de rechercher des opportunités de financements, télécharger les documents officiels et soumettre et gérer des projets.

Le moteur de recherche de cette plateforme permet d'identifier les opportunités et projets suivants, en lien avec la présente étude RECORD :

- [HORIZON-CL4-2021-RESILIENCE-01-01](#) :
  - o thématique : circularité des matériaux composites,
  - o date d'ouverture : 22 juin 2021,
  - o date de clôture : 23 septembre 2021,
  - o projet financé :
    - [EuReComp](#), relatif au recyclage et à la circularité des gros composants composites à l'échelle européenne ([projet](#) sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> avril 2022 au 31 mars 2026) ;
- [HORIZON-CL5-2022-D3-01-02](#) :
  - o thématique : démonstration de matériaux innovants, de cycles d'approvisionnement, de technologies de recyclage pour augmenter la circularité globale de la technologie de l'énergie éolienne et pour réduire l'utilisation primaire de matières premières critiques,
  - o date d'ouverture : 14 octobre 2021,
  - o date de clôture : 26 avril 2022,
  - o projets financés :
    - [Blades2Build](#), relatif au réemploi, la réutilisation et le recyclage des pales d'éoliennes en fin de vie, assorti d'un démonstrateur industriel de pré- et coprocessing ([projet](#) sur 3 ans, du 1<sup>er</sup> janvier 2023 au 31 décembre 2025),
    - [EoLO-HUBs](#), relatif à la recherche de nouvelles solutions durables et technologies innovantes pour recycler les matériaux à haute valeur ajoutée issus du recyclage des matériaux composites des pales d'éoliennes en fin de vie (projet sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> janvier 2023 au 31 décembre 2026),
    - [REFRESH](#), relatif au démantèlement, au tri et au recyclage intelligents des matériaux composites renforcés de fibres de verre provenant des pales d'éoliennes en fin de vie, selon une approche holistique (projet sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> janvier 2023 au 31 décembre 2026) ;
- [HORIZON-CL5-2023-D3-02-15](#) :
  - o thématique : technologies critiques pour améliorer la durée de vie, un démantèlement efficace et augmenter la circularité des systèmes éoliens offshore et onshore,
  - o date d'ouverture : 4 mai 2023,
  - o date de clôture : 5 septembre 2023 ;
- [HORIZON-CL5-2024-D3-02-08](#) (à venir) :
  - o thématique : minimisation des impacts environnementaux et optimisation des impacts socio-économiques dans le déploiement, l'exploitation et le démantèlement des parcs éoliens offshore,
  - o date d'ouverture estimée : 17 septembre 2024,
  - o date de clôture estimée : 21 janvier 2025.

### Horizon 2020

Horizon 2020 (H2020) était le programme-cadre européen pour la recherche et le développement (PCRD) pour la période 2014-2020. Le portail des offres et financements « [Funding & Tenders portal](#) » permet d'identifier les opportunités et projets suivants, en lien avec la présente étude RECORD :

- [CIRC-01-2016-2017](#) :
  - o thématique : projets de démonstration à grande échelle mettant en œuvre des approches systémiques et écoinnovantes pour l'économie circulaire,
  - o dates d'ouverture : 10 novembre 2015 (resp. 8 novembre 2016),
  - o dates de clôture : 8 mars 2016 et 6 septembre 2016 (resp. 7 mars 2017 et 5 septembre 2017),
  - o projet financé :
    - [FiberEUse](#), relatif au recyclage et la réutilisation de composites renforcés de fibres de verre ou de carbone en fin de vie ([projet](#) sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> juin 2017 au 30 septembre 2021) ;

## Programme LIFE

Le programme [LIFE](#) est un instrument financier de la Commission européenne, dédié au soutien de projets innovants, privés ou publics, dans les domaines de l'environnement et du climat. Pour la période 2021-2027, ce programme est réparti en 4 sous programmes :

- nature et biodiversité ;
- économie circulaire et qualité de vie ;
- atténuation du changement climatique et adaptation ;
- transition vers l'énergie propre.

À ce titre, il convient de mentionner également le consortium européen de recherche LIFE CarbonGreen, le groupe suédois d'électricité Vattenfall en est partie prenante.

En 2021, l'entreprise s'est engagée à recycler 100 % de ses pales d'éoliennes d'ici 2030 (cf. le [CP](#) du 13 octobre 2021). Le groupe annonçait plusieurs objectifs concernant la gestion des pales d'éoliennes en fin de vie :

- interdiction immédiate d'enfouissement en décharge des pales d'éoliennes démantelées sur les parcs du groupe ;
- engagement immédiat de réutiliser, recycler ou valoriser 100 % des pales démantelées ;
- atteindre un taux de recyclage de 50 % des pales d'éoliennes d'ici 2025 et de 100% d'ici 2030.

En avril 2022, l'énergéticien a entrepris le démantèlement du parc Irene Vorrink, premier parc éolien de Vattenfall à être démantelé aux Pays-Bas depuis que la société énergétique a annoncé en octobre 2021 son ambition de recycler entièrement les pales de rotor après 2030. Ce parc éolien côtier (nearshore), constitué de 28 éoliennes, est implanté le long du lac de l'Yssel/Ijssel (IJsselmeer), à l'est d'Amsterdam, à quelques mètres du rivage — le long de la digue entre Lelystad et le Ketelbrug (pont) dans la province de Flevoland (Pays-Bas). Les 28 machines, qui reposent sur des fondations monopiles cylindriques en acier dans l'eau le long de la digue, font place à 24 éoliennes plus puissantes qui font partie du projet de développement éolien Windplanblauw — repowering (cf. illustration ci-après).



Démantèlement du parc éolien néerlandais Irene Vorrink, l'un des plus anciens (25 ans) parcs éoliens terrestres des Pays-Bas — achevé en 1998 (source : [Vattenfall](#), 2022).

Comme l'indiquait Vattenfall dans un [communiqué](#) du 7 mars 2022, la construction d'éoliennes plus grandes près de la digue n'est plus autorisée pour des raisons de sécurité : les 24 nouvelles éoliennes (14 machines Vattenfall, 10 machines SwifterwinT, totalisant une capacité de 132 MW au lieu de 16,8 MW des 28 éoliennes démantelée) seront installées sur deux rangées de 12 éoliennes situées à 500

et 1500 mètres au large de la digue, sur l'IJsselmeer. En fin de démantèlement des éoliennes, une petite partie de la fondation (monopieu) en acier dépasse au-dessus de l'eau : à l'aide d'un équipement spécial, le monopieu est scié de l'intérieur à deux mètres sous le fond de l'IJsselmeer, et une fois cette partie retirée de l'eau, le reste du monopieu et le câblage resteront dans le fond de l'IJsselmeer à côté de la digue. Techniquement, il était possible de retirer la totalité du monopieu et du câblage mais pas sans compromettre la sécurité de la digue (les vibrations liées au retrait des fondations, ainsi que des infiltrations dans les trous laissés après le retrait des fondations et des câbles et écoulements d'eau sous la digue auraient pu affaiblir ou endommager celle-ci).

Afin de résoudre le problème du recyclage des pales en matériaux composites — en cohérence avec son annonce de 2021 —, le groupe suédois a fait [appel](#) à l'entreprise norvégienne [Gjenkraft AS](#), ainsi qu'au consortium européen de recherche [LIFE CarbonGreen](#) — dédié au recyclage durable des composites en fibres de carbone et des déchets de biomasse en produits à valeur ajoutée. Ce programme a développé durant 3 ans de nouveaux procédés de retraitement des pales. Ces dernières seront ainsi utilisées par Gjenkraft pour produire des fibres recyclées, des huiles et gaz de synthèse, qui entreront dans la fabrication de différents [produits](#) : articles et équipements de sport (skis, snowboards), isolants, structures composites, matériaux de construction, pièces pour [fermes solaires](#) en remplacement de l'acier ou de l'aluminium habituellement utilisés. [CarbonGreen](#) est un projet sur 3 ans, allant du 1<sup>er</sup> septembre 2021 au 31 août 2024.

### Université de Strathclyde

En avril 2021, le constructeur de parcs éoliens offshore norvégien Aker Offshore Wind, Aker Horizons (dont Aker Offshore Wind est une filiale à 100 %) et l'université de Strathclyde ([Advanced Composites Group](#) du département Mechanical and Aerospace Engineering) à Glasgow (Écosse) ont signé un protocole d'accord et mis au point un procédé novateur pour extraire la fibre de verre des pales d'éoliennes en fin de vie, qui permettrait (selon l'université de Strathclyde) de répondre à 50 % de la demande mondiale en fibre de verre (cf. [CP](#) du 22 avril 2021).

Selon les termes du protocole d'accord, les parties développeront et commercialiseront un procédé industriel unique développé à l'échelle du laboratoire par l'université de Strathclyde pour la récupération thermique et le post-traitement des fibres de verre issues de déchets de pales d'éoliennes, puis l'obtention de fibres de verre de qualité quasi identique à celle des fibres vierges. Le procédé (tenu secret) générerait des fibres de valeurs moyennes à élevées, couvrant un large spectre d'usages allant des produits les moins exigeants aux produits à haute performance.

Il s'agit d'un projet pilote sur trois ans, soutenu par le Gouvernement britannique à hauteur de 2 millions de livres sterling (environ 2,3 millions d'euros), associant chercheurs universitaires et industriels au sein du consortium :

- universitaires : université de Strathclyde ([Advanced Composites Group](#), Lightweight Manufacturing Centre du National Manufacturing Institute Scotland — [NMIS](#)), université de Nottingham ;
- industriels : Aker Offshore Wind (développeur d'éolien offshore), Composites UK (association professionnelle des entreprises travaillant dans la chaîne d'approvisionnement des composites polymères renforcés de fibres au Royaume-Uni), Suez (déchets), GRP Solutions (distributeur de composites), Cubis (fabricant de pièces composites).

L'agence de l'innovation Innovate UK soutient financièrement le projet à hauteur de 1,3 million de livres (environ 1,5 millions d'euros), Aker Offshore Wind contribuant pour plus de 500 000 livres (près de 600 000 euros). Rien n'est dit sur le procédé (« thermique ») pourtant qualifié de « révolutionnaire ».

Ce projet de recyclage de pales a été [présenté](#) par James Thomason, professeur à l'université de Strathclyde, lors d'un [workshop](#) consacré à la circularité grâce à des matériaux innovants et des technologies de recyclage, que la plate-forme européenne de technologie et d'innovation pour l'énergie éolienne [ETIPWind](#) (European Technology and Innovation Platform on Wind Energy) a organisé le 4 mai 2021 avec le soutien du GT [Sustainability](#) de WindEurope.

## SusWIND

Toujours au Royaume-Uni, le 11 novembre 2020, le [National Composites Centre](#) (NCC, Bristol) a lancé [SusWIND](#) (CP de lancement), une initiative visant à accélérer le développement de technologies, de processus et de matériaux qui favoriseraient la recyclabilité et le développement à venir des pales d'éoliennes en matériaux composites — en partenariat avec Offshore Renewable Energy (ORE) Catapult ([ORE Catapult](#), déjà présenté plus haut à l'étape 1, 2<sup>e</sup> partie) et soutenue notamment par RenewableUK (présenté plus haut à l'étape 1, 2<sup>e</sup> partie)

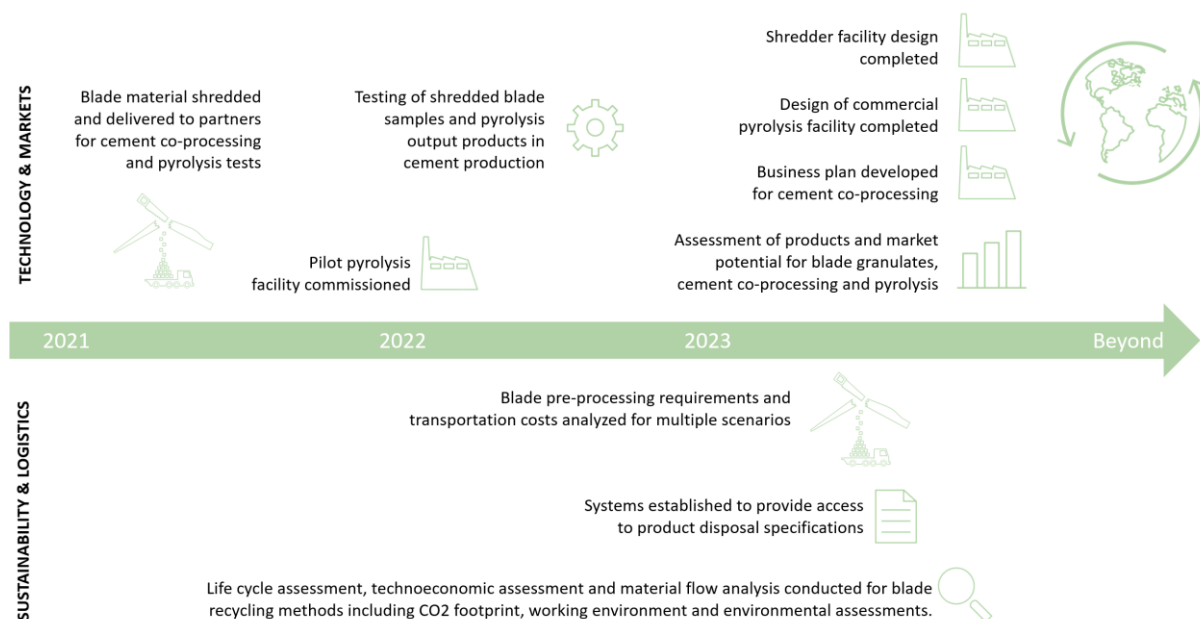
SusWIND comporte 3 volets (« recycle », « sustain », « design »), tels que décrits ci-après :

- technologies de recyclage et réutilisation dans des applications secondaires (véhicules électriques, infrastructures telles que des ponts, systèmes d'isolation thermique, etc.) ;
- durabilité des matériaux (par exemple biomatériaux, thermoplastiques) ;
- conception, en vue de leur démantèlement futur, des pales d'éoliennes.

SusWIND s'inscrit dans le cadre de Sustainable Composites dont l'action porte sur l'ensemble du cycle de vie des composites dans différents secteurs industriels utilisateurs (aéronautique, automobile, éolien, etc.). Piloté par le NCC et le Center for Process Innovation ([CPI](#)), deux des sept centres de recherche de High Value Manufacturing Catapult ([HVM Catapult](#)), Sustainable Composites est un partenariat entre l'industrie, le milieu universitaire et le Gouvernement qui exploitera les capacités de recherche et de développement technologique sur les composites.

## DecomBlades

[DecomBlades](#) est un projet de recherche et développement sur 3 ans lancé en 2021 et financé par Innovation Fund Denmark (cf. ce [CP](#) de Siemens Gamesa du 25 janvier 2021), dont l'objectif est de fournir une base pour la commercialisation du recyclage des pales d'éoliennes à l'aide de solutions durables (cf. illustration ci-après).



Chronologie du projet DecomBlades (source : [DecomBlades](#), 2023).

Considérant que les technologies de recyclage pour les pales à un stade mature existent déjà mais que celles-ci ne sont pas encore généralisées ou rentables, les [partenaires](#) du projet DecomBlades ont souhaité se concentrer sur trois procédés spécifiques, considérés comme les [technologies](#) les plus matures et les plus rentables économiquement :

- le broyage des pales d'éoliennes de manière à ce que le matériau puisse être réutilisé dans différents produits et processus (broyage mécanique) ;
- l'utilisation de matériau de pales déchetées dans la production de ciment (coprocessing en cimenterie) ;
- un procédé de séparation du matériau composite à haute température (pyrolyse).

Le consortium constitué autour de ce projet regroupe 10 partenaires industriels ou universitaires :

- fabricants d'éoliennes : Siemens Gamesa Renewable Energy, LM Wind Power (filiale de GE), Vestas Wind Systems ;
- développeur : Ørsted (chef de projet DecomBlades) ;
- équipementiers : FLSmidth (solutions d'ingénierie, d'équipement et de services pour les industries minières et cimentières), MAKEEN Power (solutions pour l'énergie) ;
- recycleur : HJHansen Recycling ;
- institutions techniques et universitaires : Energy Cluster Denmark (ECD), université du Danemark du Sud (SDU), université technique du Danemark (DTU).

À titre indicatif, l'université du Danemark du Sud SDU (Syddansk Universitet) évaluera et documentera les processus selon les [objectifs](#) suivants :

- spécifications des pales : garantir la disponibilité des informations pertinentes ;
- logistique : définir des solutions de transport rentables pour les déchets de pales ;
- four à ciment : établir et démontrer une procédure pour intégrer les pales dans le fonctionnement de la cimenterie ;
- pyrolyse : améliorer le procédé de pyrolyse pour traiter efficacement les déchets de composites ;
- broyage mécanique : traiter les pales et livrer les matériaux pour les fours à ciment et la pyrolyse selon les besoins.

Le projet DecomBlades a été [présenté](#) par Allan Poulsen, responsable des structures avancées et de la durabilité chez Vestas, lors d'un [workshop](#) consacré à la circularité grâce à des matériaux innovants et des technologies de recyclage, que la plate-forme européenne de technologie et d'innovation pour l'énergie éolienne [ETIPWind](#) (European Technology and Innovation Platform on Wind Energy) a organisé le 4 mai 2021 avec le soutien du GT [Sustainability](#) de WindEurope.

### Étude UBA 2022

En 2020 en Allemagne, le Bureau (Agence) fédéral(e) de l'environnement UBA (Umweltbundesamt) a lancé une étude sur 2 ans concernant l'élaboration de normes relatives au démantèlement et au recyclage des pales d'éolienne — cf. étape 1, 2<sup>e</sup> partie, section Réglementation relative à la fin de vie des éoliennes, Gestion des déchets de composites (Allemagne). Les résultats de cette étude ont été publiés au cours de l'été 2022 (voir le [CP](#) de l'UBA du 12 septembre 2022 et voir la [liste](#) des auteurs de l'étude).

L'UBA a ainsi commandé une enquête sur les techniques de démantèlement disponibles, les a évaluées selon des critères environnementaux et a formulé des exigences en matière de santé et de sécurité au travail et de protection de l'environnement. Par exemple, le meulage des pales de rotor sur site avant recyclage peut dégager des émissions de poussières contenant des fibres de carbone ou de verre. Des processus doivent être établis pour empêcher cette poussière de pénétrer dans l'environnement ou de nuire à la santé des travailleurs. L'étude propose des normes d'assurance qualité contraignantes pour le traitement ultérieur des pales de rotor dans une usine de recyclage.

L'étude porte une attention particulière aux technologies de broyage et aux méthodes de fractionnement. Un organigramme en plusieurs étapes a été développé pour illustrer la séparation des composants qui peut être appliquée à tous les types de pales de rotor. Tous les procédés de recyclage possibles pour les différents composants d'une pale de rotor sont décrits en détail afin que les recycleurs aient désormais accès aux procédés les plus sûrs et les plus respectueux de l'environnement. La pyrolyse et la récupération se sont révélées être les méthodes les plus efficaces pour recycler les fibres de carbone. En revanche, le recyclage des plastiques renforcés de fibres de verre est encore loin d'être optimal. Le recyclage dans les cimenteries est une option possible, mais de nouvelles recherches suggèrent que leur utilisation dans la fusion du verre de meilleure qualité devrait être étudiée.

L'étude de l'UBA conclut par des recommandations en matière de normes techniques de démantèlement et de recyclage des pales des rotors.

Les points saillants de cette étude sont rappelés ci-après.

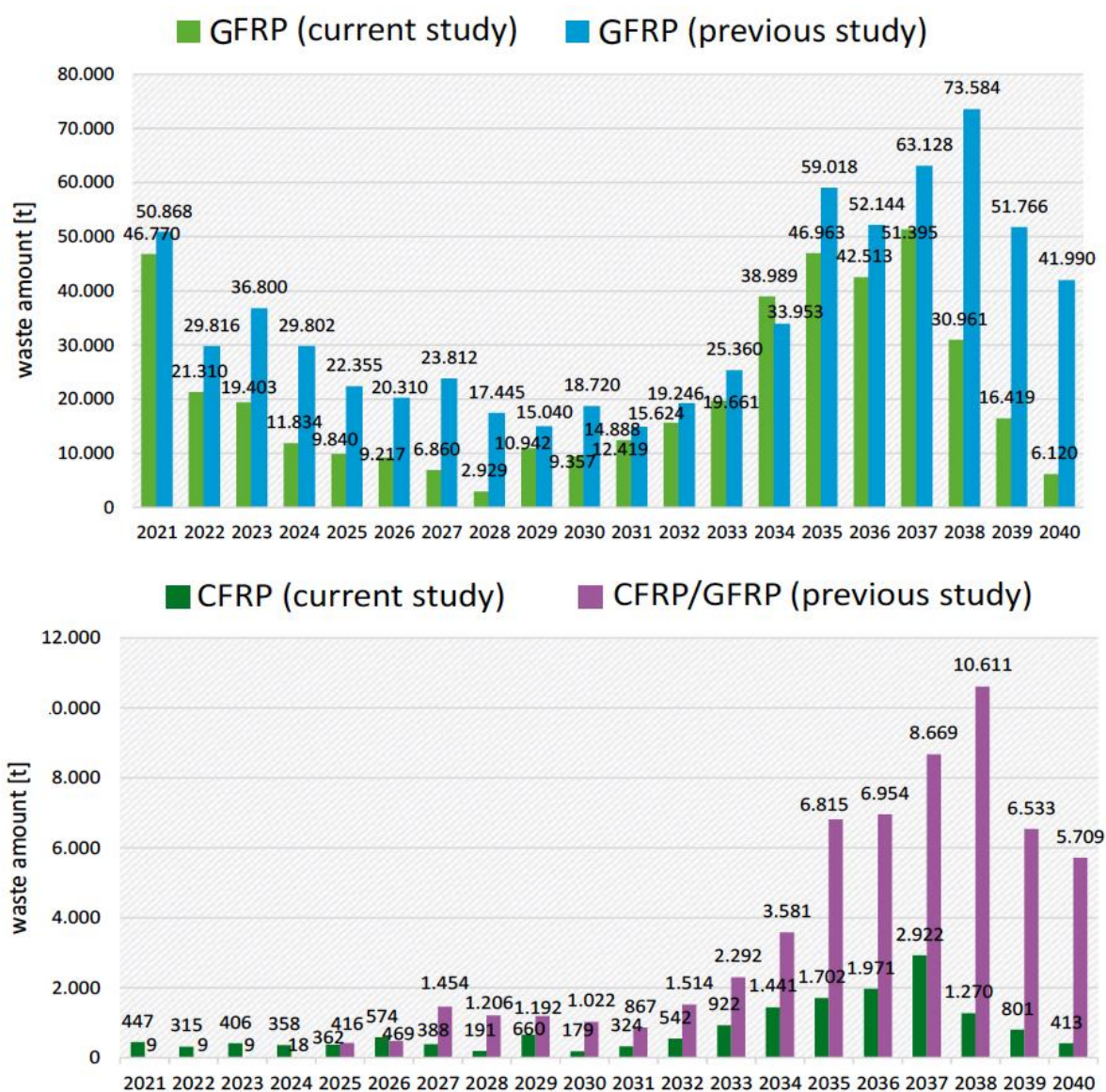
L'étude intégrale (en allemand, 582 pages) présente une revue complète des meilleures techniques actuellement disponibles et durables pour le traitement et le recyclage des déchets de pales d'éoliennes — prise en compte des aspects techniques, juridiques et organisationnels.

Il convient de préciser que cette étude est uniquement basée sur la littérature, des entretiens avec des experts et les propres résultats des travaux de recherches scientifiques conduits par les auteurs — aucune recherche expérimentale n'a été faite pour l'étude.

Le premier objectif était de dresser un panorama exhaustif des types actuels de pales de rotor en Allemagne et d'estimer leur composition matérielle et les volumes issus de la démolition et du repowering des éoliennes onshores et offshores d'ici 2040.

Les estimations effectuées par les auteurs indiquent que d'ici 2040, entre 326 000 et 430 000 tonnes de déchets de pales d'éoliennes à base (exclusivement) de fibres de verre seront générés. Au cours de la même période, les volumes de déchets attendus pour les composites renforcés de fibres de verre et de carbone sont évalués entre 77 000 et 212 000 tonnes — en Allemagne, 11 % à 32 % des éoliennes ont des pales en matériau composite à base de fibres de verre et de carbone, avec une teneur en composite à base de carbone allant de 5 % à 20 %.

Les volumes estimés de déchets varient entre 3 000 et 75 000 tonnes par an pour les matériaux à base de fibres de verre, et de moins de 1 000 à 3 000 tonnes par an pour les matériaux à base de fibres de carbone (cf. illustration ci-après).



Flux sortants de déchets de pales (source : les auteurs de l'étude de l'UBA, d'après données du Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion — [KIT/IIP](#), 2022).

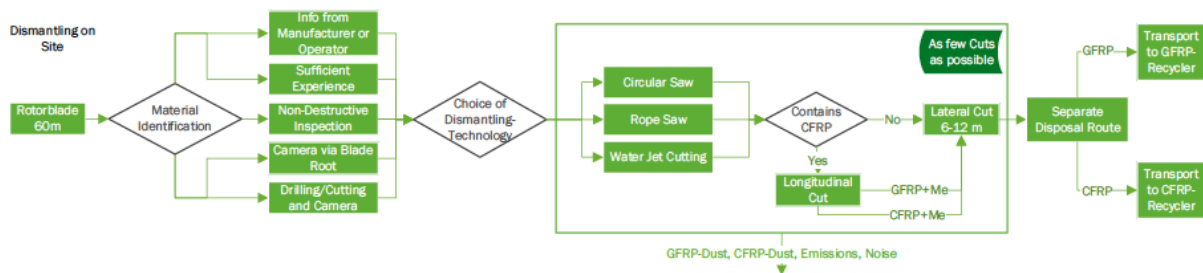
Les volumes totaux de déchets de pales de rotor en Allemagne sur la période considérée oscillent entre 10 000 et 75 000 tonnes par an.

L'étude fait état de fortes incertitudes dans la collecte et la disponibilité des données, qui compromettent l'exactitude de ces prévisions.

Eu égard à l'évaluation des risques liés à l'exposition aux fibres et poussières de matériaux composites, l'étude ne comporte aucune proposition de valeurs seuils.

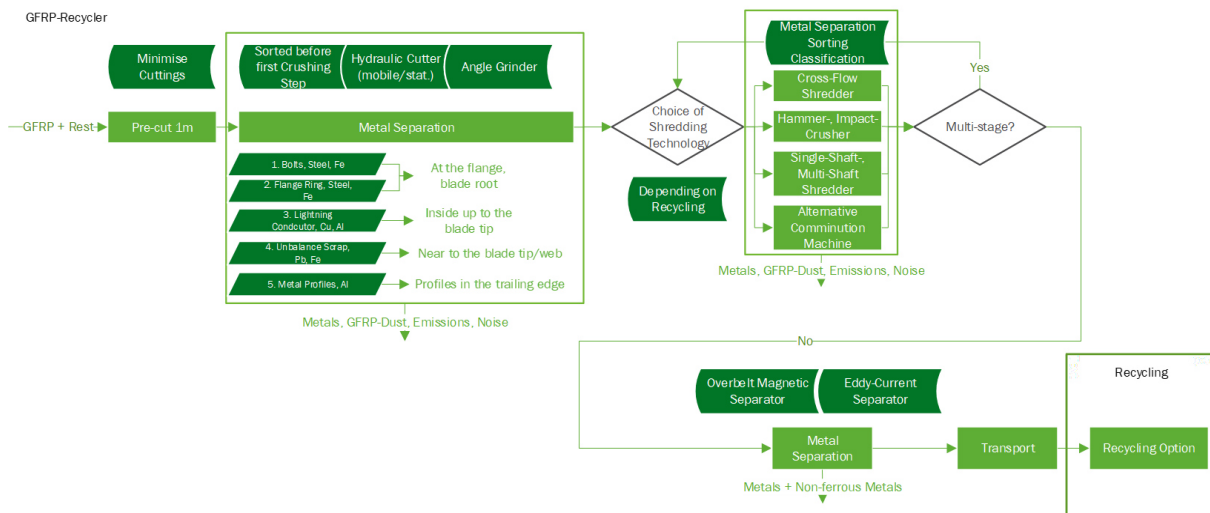
Un besoin de recherche toxicologique est identifié pour évaluer la biopersistance et l'effet des fibres de verre et de carbone dans les poumons, le comportement des fragments de fibres dans l'environnement et pour déterminer la concentration de particules et de fibres exposées.

Concernant les procédés techniques de recyclage des pales de rotor, l'étude débute par une évaluation du démantèlement et de la segmentation sur site (On-site pretreatment), suivie d'un organigramme pour le traitement en usine et la séparation des matériaux (Factory processing), et enfin par une description des procédés de recyclage disponibles (Recovery and recycling) et, dans le cas des matériaux composites, procédés de recyclage qui nécessitent un développement ultérieur (cf. illustration ci-après).



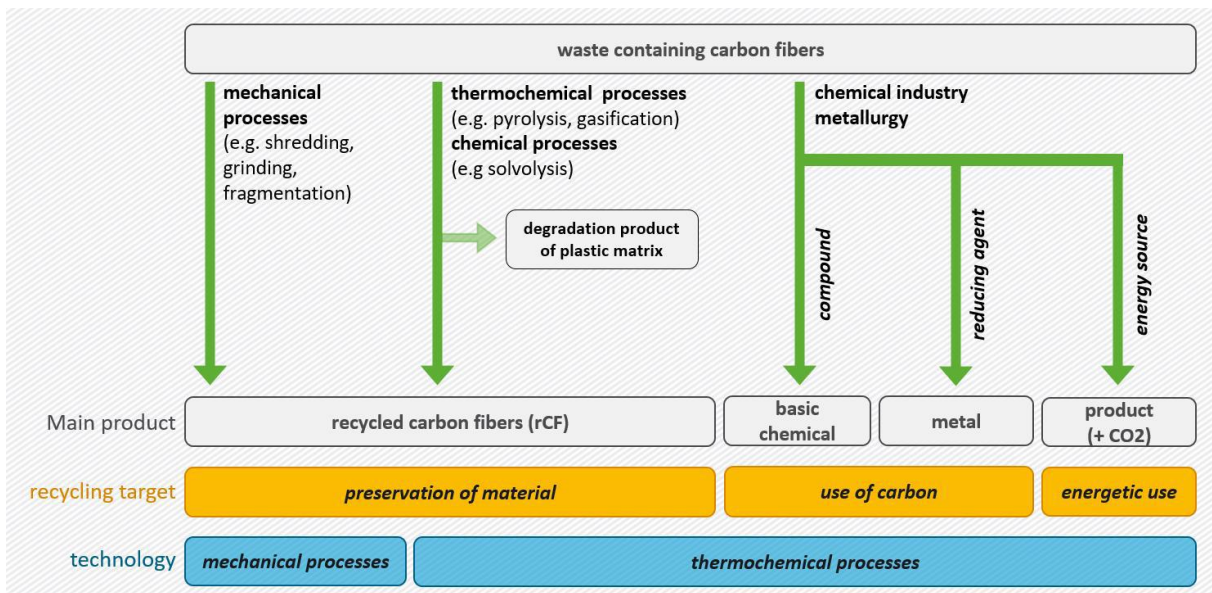
Organigramme du démontage des pales du rotor et de la première phase de découpe sur site d'une éolienne (source : les auteurs de l'étude de l'UBA, d'après données du Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie — [ICT](#), 2022).

Un diagramme de flux de traitement est proposé pour le recyclage des ressources clés (cf. illustration ci-après).



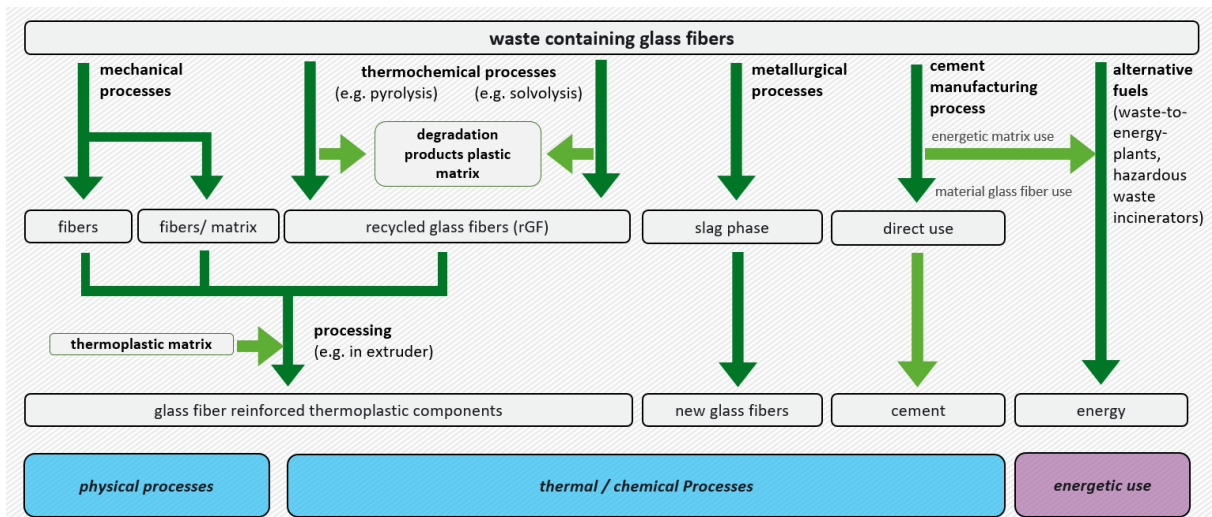
Séparation des composants métalliques des pales de rotor et sélection de la technique de broyage (source : les auteurs de l'étude de l'UBA, d'après données du Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie — [ICT](#), 2022).

Des voies de traitement pour les déchets à base de fibres de carbone sont présentées (cf. illustration ci-après).



Vue d'ensemble des voies de traitement potentielles pour la valorisation des déchets contenant des fibres de carbone (source : les auteurs de l'étude de l'UBA, d'après données du Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion — [KIT/IIP](#), 2022).

Des voies de traitement pour les déchets à base de fibres de verre sont présentées (cf. illustration ci-après).



Vue d'ensemble des voies de traitement potentielles pour la valorisation des déchets contenant des fibres de verre (source : les auteurs de l'étude de l'UBA, d'après données du Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion — [KIT/IIP](#), 2022).

~ ~ ~

Toujours en Allemagne, à noter ce projet relatif à la phase conceptuelle du recyclage et de la réutilisation des pales de rotor en matériaux composites [KoReNaRo](#) (Konzept für Recycling und Nachnutzung von Rotorblättern), coordonné par l'Institut Fraunhofer pour les systèmes éoliens IWES (Institut für Windenergiesysteme) — cf. ce [CP](#) du Fraunhofer IWES du 6 avril 2022.

Le projet a été lancé en octobre 2021 (jusqu'en juin 2022) et financé à hauteur de 150 000 € dans le cadre du programme de recherche pour le développement durable FONA3 (Forschung für nachhaltige Entwicklungen) du ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), pour la conception d'un système de démonstration.

À mi-2023, une décision est toujours attendue concernant le financement de la mise en œuvre (seconde phase).

**Synthèse des méthodes et procédés de recyclage les plus avancés des pales à base de matériaux composites (hors écoconception et mise en œuvre de matériaux innovants).**

| Typologie pales                                       | Méthode/procédé/technologie de recyclage                                | Maturité technologique, industrialisation                                                                          | Coût, viabilité économique                                                                                                                                                                                                                                                           | Gisements, disponibilité/accessibilité, volumes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Débouchés des recyclats, marchés                                                                                                                                                                                                                  | Impacts/risques environnementaux/sanitaires (RSE)                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Composites à base de fibres de verre ou de carbone    | Broyage mécanique fin (valorisation matière)                            | Maturité technologique variable selon que les renforts sont en fibres de verre (TRL = 9) ou de carbone (TRL = 6-7) | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Traitement peu coûteux (&lt; 4,5 €/kg) et peu énergivore mais procédé non compétitif par rapport à l'utilisation de matières premières vierges</li> <li>. Voie la plus économiquement viable avec le coprocessing en cimenteries</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Composites à base de fibres de verre : flux significatifs en 2025+</li> <li>. Composites à base de fibres de carbone : flux significatifs en 2035-2040+</li> <li>. La plupart des déchets sont traités par broyage ou coprocessing en attendant l'industrialisation d'autres procédés de recyclage (phase transitoire)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Renfort ou charges pour des composites thermodurcissables avec taux d'incorporation ≤ 10 %</li> <li>. Nombreux débouchés actuels ou potentiels mais marchés surcapacitaires sur le long terme</li> </ul> | Émissions de poussières, dégagements de fumées                                                                                                                         |
| Composites à base de fibres de verre                  | Coprocessing en cimenteries (valorisation mixte matière et énergétique) | Procédé mature (TRL = 9)                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Traitement coûteux (de 95 à 110 €/t hors transport et découpe à 0,16 €/kg)</li> <li>. Voie la plus économiquement viable avec le broyage mécanique fin mais réservée aux composites renforcés de fibres de verre</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Composites à base de fibres de verre : flux significatifs en 2025+</li> <li>. La plupart des déchets sont traités par broyage ou coprocessing en attendant l'industrialisation d'autres procédés de recyclage (phase transitoire)</li> </ul>                                                                                      | Cimenteries mais compétition avec d'autres filières utilisatrices de composites                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Émissions de gaz d'échappement</li> <li>. Moins impactant pour l'environnement et la santé que la mise en décharge</li> </ul> |
| Composites à base de fibres de carbone, de préférence | Pyrolyse                                                                | Procédé plutôt mature (TRL = 9)                                                                                    | Coût de traitement de 11 à 17 €/kg (onéreux pour composites à base de fibres de verre)                                                                                                                                                                                               | Composites à base de fibres de carbone : flux significatifs en 2035-2040+                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Matériaux d'isolation ou fibres de renfort (aéronautique, automobile, sports et loisirs)                                                                                                                                                          | Émissions n de gaz                                                                                                                                                     |
| Composites à base de fibres de carbone, de préférence | Solvolyse                                                               | Procédé quasi mature (TRL = 5/6)                                                                                   | Coût de traitement de 11 à 17 €/kg (onéreux pour composites à base de fibres de verre)                                                                                                                                                                                               | Composites à base de fibres de carbone : flux significatifs en 2035-2040+                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Recyclage en boucle ouverte ou fermée des renforts et de la matrice                                                                                                                                                                               | Utilisation de solvants et catalyseurs                                                                                                                                 |

La hiérarchisation (télécharger cette [étude](#) du Net Zero Technology Centre, 2021) des techniques de recyclage des composites à base de fibres de verre ou de carbone en fonction de valeurs environnementales, techniques, économiques et sociétales, réalisée selon une analyse multicritère (émissions de gaz à effet de serre, conditions du processus, résultats du processus, facilité de réutilisation, impact environnemental, rentabilité et opportunités de la chaîne d'approvisionnement) indique que :

- la technique de pyrolyse se classe au premier rang pour les composites à base de fibres de carbone (CFRP), produisant une fibre recyclée de bonne qualité à un coût raisonnable et avec un impact environnemental limité ;
- compte tenu du faible coût de la fibre de verre, la technologie la plus adaptée actuellement pour les composites à base de fibres verre (GFRP) est le broyage mécanique fin qui, bien que les fibres en ressortent endommagées, est le moins coûteux et le moins impactant sous l'angle environnemental.

| Ranking | CFRP                         | GFRP                      |
|---------|------------------------------|---------------------------|
| 1       | Pyrolysis                    | Grinding                  |
| 2       | Grinding                     | Cement kiln co-processing |
| 3       | Mircowave assisted pyrolysis | Pyrolysis                 |

Hiérarchisation des méthodes de recyclage (source : [étude](#) du Net Zero Technology Centre, 2021).

### 2.1.2 - Matériaux

Dans cette sous-partie, il s'agit de présenter les différents travaux en cours relatifs à la substitution des résines thermodurcissables — majoritairement employées dans l'élaboration des pales d'éoliennes — par des composites thermoplastiques (polymères thermofusibles).

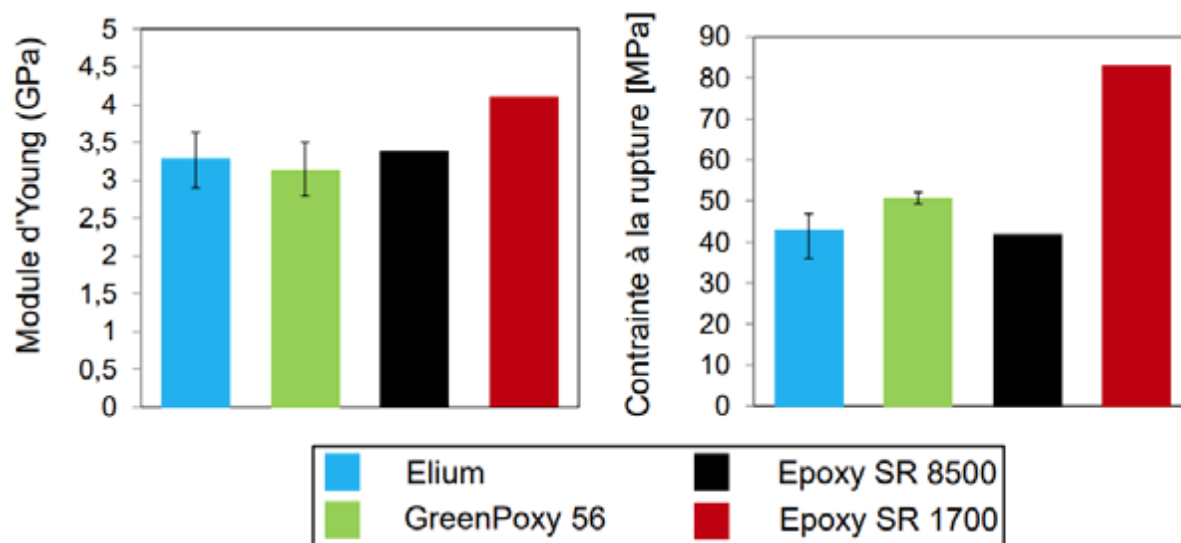
Il s'agit également de présenter les développements récents d'un nouveau concept de composites autorenforcés à matrice thermoplastique SRP (Self-Reinforced Polymers) : ces composites polymères autorenforcés — également appelés plastiques autorenforcés ou composites polymères simples — sont des matériaux composites renforcés de fibres, le renfort fibreux de ces matériaux étant une version hautement orientée du même polymère à partir duquel la matrice est fabriquée.

Outre un axe procédé, ce [guide](#) (rapport technique déjà cité ci-avant) du recyclage et de l'écoconception des composites (Grec), publié par l'Ademe en mai 2022, présente les innovations pour lesquelles des développements ont été identifiés à une échelle laboratoire ou préindustrielle en matière de matériaux.

#### Résine Elium

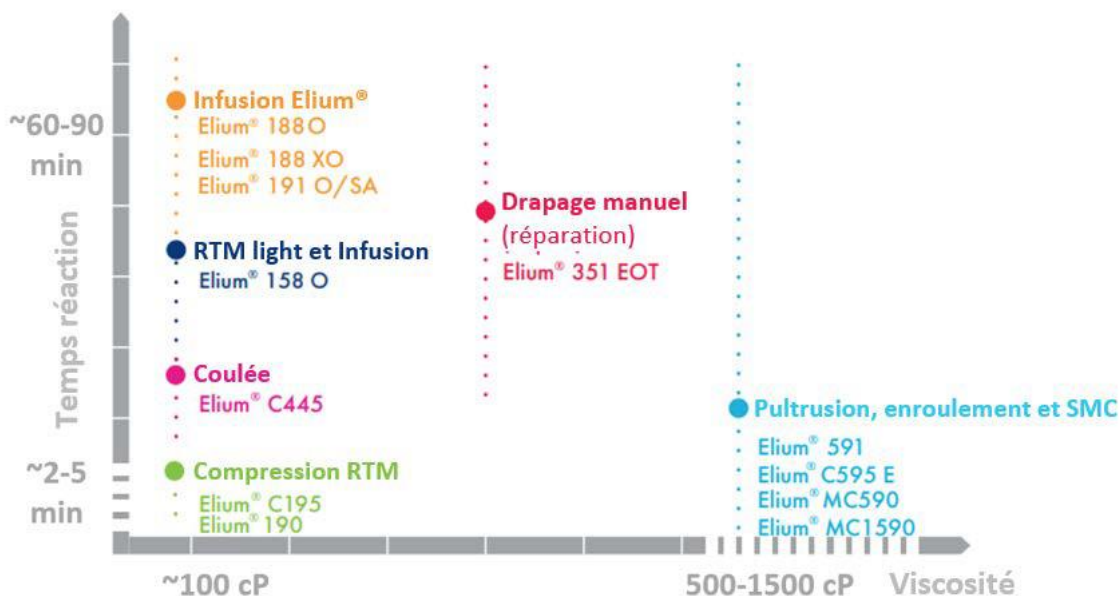
« Elium » est une résine acrylique, développée par la société Arkema et apparue en 2014. Il s'agit d'une résine thermoplastique (et non thermodurcissables) réactive bi-composante, dont la viscosité à température ambiante est compatible avec les procédés LCM (Liquid Composite Molding), de l'ordre de 100 à 500 cP (1 centipoise [cP] = 1 mPa.s — soit la viscosité de l'eau). Après polymérisation, le comportement mécanique de cette résine est très proche de celui du PMMA — poly(methyl methacrylate). La faible viscosité initiale et le caractère thermoplastique de cette matière permettent actuellement à la résine Elium de concurrencer les résines thermodurcissables en termes de recyclabilité, de mis en œuvre et de propriétés mécaniques qui s'approchent de celles des résines

thermodurcissables de type époxy — module d'Young et contrainte à la rupture, respectivement comparables (cf. illustration ci-après).



Comparaison des principales propriétés mécaniques de la résine Elium et de résines époxy commerciales (source : [Ademe](#), 2022).

Arkema a développé et mis au point différents grades pour la résine Elium, adaptés aux différents procédés de mise en œuvre des matériaux composites : infusion de résine, moulage par transfert de résine RTM (Resin Transfer Molding, préimprégné en feuille SMC (Sheet Molding Compound), pultrusion (extrusion par tirage), etc. (cf. illustration ci-après).



Différents grades de résine Elium (source : [Ademe](#), 2022).

Selon Arkema, les pièces composites à base de résine Elium sont recyclables de deux façons : par broyage mécanique ou par recyclage chimique (ci-après).

Historiquement, la résine Elium s'inscrit dans le cadre du projet [Effiwind](#). [Effiwind](#) était un projet accompagné financièrement par l'Ademe (P. I. A.), lancé en mars 2014 pour une durée de 4,5 ans, visant à mettre en œuvre des composites à base de polymères thermoplastiques acryliques pour la fabrication de pièces de grandes dimensions pour l'éolien en mer (pales, capots de nacelle). C'est dans le cadre du programme Effiwind qu'a été mise au point en 2018 par Arkema, en partenariat avec la plateforme technologique « composites & matériaux avancés » [Canoe](#) (Composites en Aquitaine, Nanostructures OrganiquEs), la résine thermoplastique [Elium](#) destinée à la fabrication de pales

d'éoliennes recyclables. Expertise : Christophe Magro, directeur adjoint et responsable projets coopératifs de la plateforme Canoe, centre R&T spécialisé en matériaux et procédés avancés.

Le projet Effiwind a fait l'objet d'une [présentation](#) par Christophe Magro le 12 mars 2020 à Berlin, lors d'une [conférence](#) organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en fin de vie, en France et en Allemagne — dispositifs réglementaires en vigueur, retours d'expérience, aspects économiques, conception, etc. ; voir le [programme](#) de cette conférence). Le projet Effiwind avait déjà été [évoqué](#) par Sébastien Billeau, ingénieur à l'Ademe, lors d'un [séminaire](#) sur le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de ce séminaire), organisé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique ([Ofate](#)), le 21 mai 2019 à Paris.

Pour le recyclage, les pièces composites à base de la résine Elium sont grossièrement broyées (traitement mécanique). Les granulats sont alors dépolymérisés à chaud (traitement thermique) afin de récupérer et purifier la résine dotée des mêmes caractéristiques que la résine vierge (réutilisable en boucle fermée). Les fibres de carbone ou de verre, récupérées également, sont également réutilisables (en boucle ouverte).

La résine [Elium](#) a également été employée pour la réalisation par [LM Wind Power](#) à Ponferrada (Espagne), en mars 2022 (ci-après), d'une pale prototype de 62 mètres entièrement recyclable, dans le cadre du consortium ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch), lancé en septembre 2020 pour une période de 42 mois (3,5 ans — fin du projet initialement prévue en 2023 reportée au 2<sup>e</sup> trimestre 2024 selon Tatiana Bratec d'Engie, budget de 18,5 M€) et piloté par l'[IRT \(institut de recherche technologique\) Jules Verne](#) basé à Nantes (cf. ce [CP](#) de l'IRT JV du 23 septembre 2020).

## Projet ZEBRA

ZEBRA (Zero waste Blade ReseArch) est un [projet](#) porté par l'IRT Jules Verne de pales d'éoliennes en composites thermoplastiques 100 % recyclables, proposées comme alternative aux pales d'éoliennes en composites thermodurcissables.

ZEBRA rassemble plusieurs acteurs industriels et centres de recherche au sein d'un consortium<sup>17</sup> et vise à démontrer la faisabilité technico-économique et environnementale de pales d'éoliennes entièrement recyclable en thermoplastique, dans une approche d'écoconception.

Après une année de développement, de tests des matériaux et d'essais de procédés, le consortium ZEBRA a franchi le 17 mars 2022 (cf. ce [CP](#) d'Arkema du 21 mars 2022) une étape clé avec la réalisation d'une pale prototype de 62 mètres recyclable fabriquée à partir de la résine thermoplastique liquide [Elium](#) d'Arkema et de nouveaux matériaux en fibre de verre haute performance d'Owens Corning (fabrication de pièces de grandes dimensions par infusion de résine [Elium](#)).

Le prototype a été conçu et réalisé sur le site LM Wind Power (cf. ce [CP](#) de General Electric du 17 mars 2022) à Ponferrada en Espagne (cf. illustration ci-après).



Première pale prototype du projet ZEBRA (source : [Arkema](#), 2022).

Les éléments composites à base de résine Elium sont recyclables par voie chimique qui permet de dépolymériser la résine, séparer les fibres de verre de la résine et de récupérer une nouvelle résine vierge réutilisable en boucle fermée et des fibres de verre à haute performance également réutilisables. Comme indiqué à propos du projet Effiwind, la résine Elium est recyclable par broyage mécanique en pièces de petites dimensions, chauffées pour fabriquer de nouvelles pièces composites. La méthode développée par Arkema et CANOE est applicable à toutes les pièces composites, y compris les déchets de production des pales.

Pour le consortium, les prochaines étapes sont :

- effectuer des tests de durée de vie structurelle de la pale en grandeur nature afin de vérifier les performances du nouveau matériau composite ;
- valider les méthodes de recyclage des déchets de production et de cette première pale après démantèlement.

Le projet ZEBRA a été [présenté](#) par John Korsgaard, directeur Advanced Technology Development & Chief Engineering chez LM Wind Power, lors d'un [workshop](#) consacré à la circularité grâce à des matériaux innovants et des technologies de recyclage, que la plate-forme européenne de technologie et d'innovation pour l'énergie éolienne [ETIPWind](#) (European Technology and Innovation Platform on Wind Energy) a organisé le 4 mai 2021 avec le soutien du GT [Sustainability](#) de WindEurope.

Début 2017, Arkema (cf. de [CP](#) d'Arkema du 20 février 2017) avait déjà rapporté la fabrication d'une première pale d'éolienne en résine thermoplastique Elium aux Etats-Unis, dans le cadre d'un projet visant à valider la faisabilité de la production industrielle d'une telle pale, coordonné par l'Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation ([IACMI](#)).

<sup>17</sup> Acteurs industriels et centres de recherche du consortium ZEBRA : [Arkema](#), [Canoe](#), [Engie](#), [LM Wind Power](#), [Owens Corning](#), [Suez](#).

Fin 2020, des chercheurs du National Renewable Energy Laboratory ([NREL](#)) du Département américain de l'énergie DoE (U.S. Department of Energy), en partenariat avec la division américaine d'Arkema (Pennsylvanie), rapportaient les résultats d'une recherche américaine identifiant un nouveau matériau en résine thermoplastique (Elium) pour la construction de pales d'éoliennes recyclables de 13 mètres (cf. ce [CP](#) du NREL du 17 novembre 2020). Selon l'[article](#) original paru dans la revue Renewable Energy en février 2021, l'utilisation de la résine thermoplastique Elium rend non seulement les pales d'éoliennes plus recyclables, mais permet également la construction de pales plus longues et plus légères, et à moindre coût que les pales en composites thermodurcissables. Les chercheurs indiquent que l'emploi de résine thermoplastique pourrait également permettre aux fabricants de construire des pales d'éoliennes sur place, rendant inutile le transport de pales aux dimensions croissantes. La publication des résultats de ces travaux du NREL avec Arkema intervient moins de deux mois après l'annonce fin septembre 2020 du démarrage du projet ZEBRA.

Les travaux ont été réalisés au sein de l'installation [CoMET](#) (Composites Manufacturing Education and Technology) du NREL. CoMET a ouvert ses portes en 2017, fruit d'un partenariat de financement entre les Advanced Manufacturing and Industrial Decarbonization Offices de l'U.S. Department of Energy, l'institut [IACMI](#) (Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation), l'État du Colorado et le NREL. En octobre 2020, ce [projet](#) d'Advanced Thermoplastic Resins for Manufacturing Wind Turbine Blades, une technologie issue de CoMET, a été [récompensé](#). Les matériaux des pales thermoplastiques sont assemblés par soudage thermique, un procédé maîtrisé par le NREL (cf. ces deux CP du NREL du [1<sup>er</sup> novembre 2021](#) et du [30 août 2022](#)).

### RecyclableBlade

L'entreprise germano-espagnole Siemens Gamesa, l'un des principaux fabricants d'aérogénérateurs au monde, développe une nouvelle résine pour l'élaboration des pales d'éoliennes, dans le but de permettre leur recyclage par trempage des composites dans un bain d'acide chauffé afin de séparer (et réutiliser) les deux composants (résine et fibres de carbone).

Ainsi, trois années de recherche ont permis à l'entreprise de « mettre au point, avec un fournisseur, une nouvelle résine qui a la propriété d'être réversible sans altérer les caractéristiques physiques de la pale ; il suffit de plonger la résine dans un bain acide légèrement chauffé pour séparer la résine, le carbone et la fibre de verre », comme l'indique Filippo Cimitan, directeur général en France de Siemens Gamesa Renewable Energy, cité dans cet [article](#) paru le 21 février 2022 dans Les Échos Planète.

Le 7 septembre 2021, Siemens-Gamesa annonçait (cf. ce [CP](#) de Siemens Gamesa du 7 septembre 2021) le lancement commercial de la première pale d'éolienne 100 % recyclable. Destinée dans un premier temps aux turbines offshore, la RecyclableBlade, fabriquée à Aalborg (Danemark), est composée d'un nouveau type de résine dont la composition chimique permet de séparer en fin de vie les différents composants de façon efficace tout en préservant leurs propriétés physiques, afin qu'ils puissent être réutilisés ultérieurement (traitement acide doux). Les six premières RecyclableBlade mesurent 81 mètres de long — la RecyclableBlade est disponible en plusieurs tailles : 81, 108 et 115 mètres — et seront utilisées pour le parc éolien offshore de Kaskasi (Allemagne) développé par l'énergéticien allemand [RWE](#). La première livraison et mise en service sur le parc éolien offshore de Kaskasi a eu lieu en juillet 2022 (cf. ce [CP](#) de Siemens Gamesa du 1<sup>er</sup> août 2022). À terme, 38 éoliennes de 8 MW seront équipées de ces pales longues de 81 mètres.

D'autres développeurs éoliens ont manifesté leur intérêt pour cette technologie : par exemple l'allemand WPD (parc offshore de WPD à Brême) et EDF. Ainsi, le 29 août 2022, le parc éolien en mer du Calvados — porté notamment par EDF Renouvelables — [annonçait](#) la commande auprès de Siemens Gamesa de plusieurs sets (10 éoliennes du parc) de la RecyclableBlade. Le parc éolien en mer du Calvados sera le premier parc français à déployer ces pales recyclables innovantes.

Siemens-Gamesa reste avare en détails concernant la composition de sa RecyclableBlade, évoquant seulement « une combinaison de matériaux moulés avec de la résine » dont « la structure chimique [...] permet de séparer efficacement la résine des autres composants en fin de vie ». Dans ses communiqués de presse, le fabricant fait également l'impasse sur le taux de valorisation, se contentant d'assurer que « les matériaux peuvent être réutilisés pour de nouvelles applications après séparation ».

RecyclableBlade, conçue pour les pales construites d'un seul tenant sans joint de colle (contrairement aux pales d'éoliennes terrestres construites en deux morceaux), est pour l'heure réservée aux éoliennes maritimes, minoritaires (l'Ademe estime qu'à l'horizon 2030, les aérogénérateurs offshore ne devraient pas représenter plus de 20 % du marché mondial de l'éolien). Les pales RecyclableBlade

sont plus coûteuses à produire mais aussi plus solides, réduisant les onéreuses opérations de maintenance en mer.

L'ambition de Siemens Gamesa est de rendre toutes ses pales entièrement recyclables en 2030, puis toute l'éolienne en 2040.

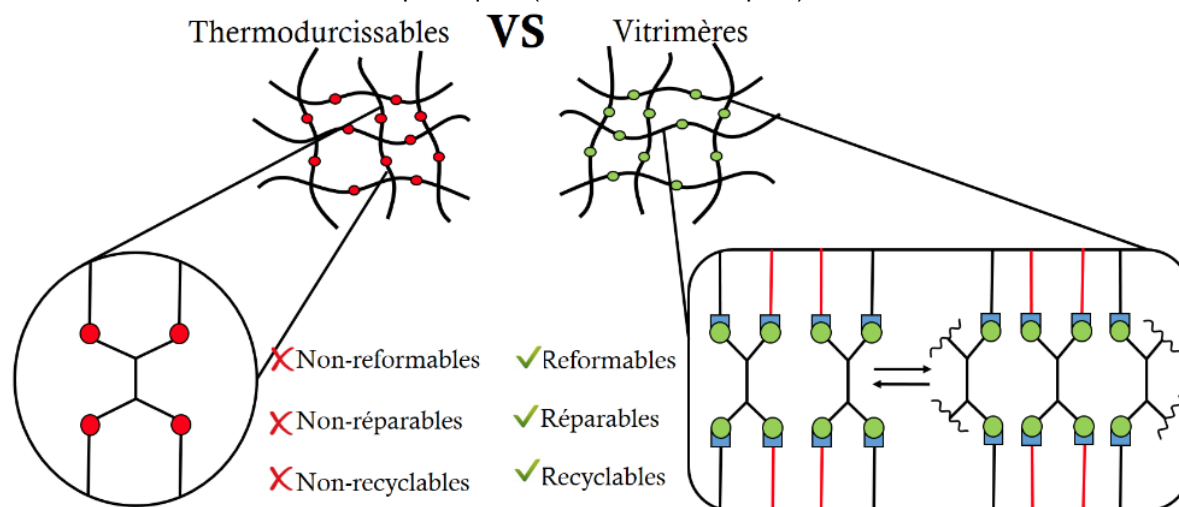
En septembre 2022, Siemens Gamesa a lancé sa RecyclableBlade pour les projets éoliens terrestres (cf. ce [CP](#) de Siemens Gamesa du 22 septembre 2022).

### Vitrimères

Actuellement, la plupart des matériaux composites à matrice polymère sont réalisés à partir de résines thermodurcissables, apportant de meilleures propriétés mécaniques et chimiques que les thermoplastiques. Elles se différencient par leur structure à l'échelle moléculaire organisée en un seul réseau réticulé tridimensionnel. Cela leur apporte de meilleures propriétés mécaniques et les rend insolubles, qualités très recherchées en matière de matériaux (augmentation de la résistance mécanique et de la durée de vie).

Ces résines se présentent la plupart du temps sous forme liquide lors de la fabrication des composites et de l'imprégnation des renforts. Ce n'est qu'une fois les renforts imprégnés par le liquide que la réaction chimique permettant la formation de ces réseaux est amorcée. Le réseau tridimensionnel formé par les matrices thermodurcissables est permanent — dans la pratique, les matrices ne peuvent être ni fondues, ni solubilisées. Cette caractéristique propre aux matrices thermodurcissables rend les composites difficiles à recycler.

Depuis 2011, une équipe du laboratoire de l'École supérieure de physique et de chimie Industrielles de la ville de Paris (ESPCI Paris), sous la direction de [Ludwik Leibler](#), mène des recherches sur la recyclabilité des composites, donnant naissance à une nouvelle classe de polymères, appelée « vitrimère », un matériau plastique façonnable à chaud comme du verre et classé entre les thermodurcissables et les thermoplastiques (cf. illustration ci-après).



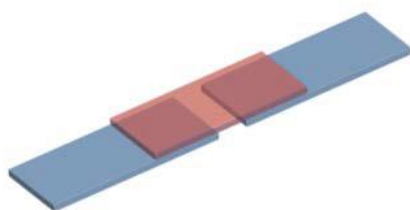
Propriétés comparées des nœuds de réticulation des composites thermodurcissables et des vitrimères (source : [Ademe](#), 2022).

Ces nouveaux polymères possèdent les mêmes caractéristiques que les thermodurcissables et génèrent des réseaux tridimensionnels très résistants lorsque la réaction chimique est amorcée. Mais, contrairement aux thermodurcissables, les nœuds de réticulation formant le réseau ont la capacité de se dissocier et de se recombinaison en continu, sous l'effet d'une augmentation de température — typiquement de 100 à 200 °C. Ces réseaux possèdent des fonctions chimiques particulières et contiennent des catalyseurs dans leur formulation. Les réseaux des vitrimères ont la capacité de se réorganiser en fonction de la température, sans modifier le nombre de liaisons intramoléculaires ni se dépolymériser. L'augmentation de la température favorise des réactions d'échange entre les différents nœuds du réseau, dont le nombre va globalement rester constant (points verts sur le schéma ci-dessus). Sous l'effet de la chaleur, la cohésion au sein du vitrimère diminue, rendant le matériau plus malléable et susceptible d'être modifié dans sa forme. Cette propriété place les vitrimères à la frontière entre les thermodurcissables et les thermoplastiques. Une fois le procédé terminé, le matériau retrouve sa structure tridimensionnelle et ses propriétés.

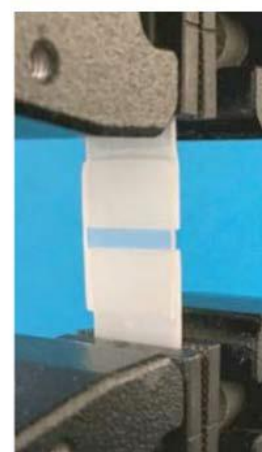
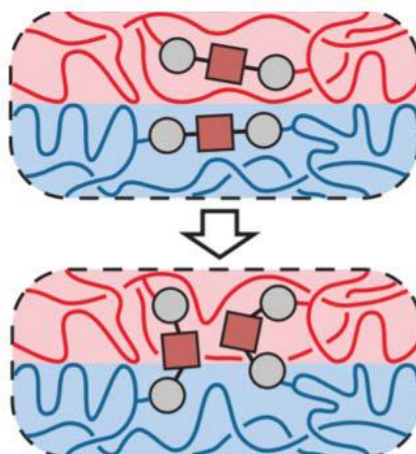
La réversibilité du réseau permet à ces polymères de faire réduire fortement leur viscosité avec l'élévation de température et de présenter des caractéristiques analogues à celles des thermoplastiques lors de leur fabrication, autorisant la mise en œuvre des vitrimères par les procédés largement répandus dans l'industrie de la plasturgie (thermoformage, extrusion, injection, etc.) et laissant envisager une certaine recyclabilité des vitrimères.

Des études ont par ailleurs montré que les vitrimères présentent une capacité d'autoréparation. De manière prospective, on peut imaginer qu'après avoir été soumis à une forte sollicitation mécanique, les endommagements matriciels engendrés sur un matériau composite à base de vitrimères (fissurations, délaminages) puissent être réparés en appliquant un stimulus thermique. La capacité des vitrimères à réarranger leurs réseaux permettrait de corriger ces défauts et récupérer les propriétés initiales de la pièce. La suppression d'une fissure voire la recombinaison de la matière vitrimère après rupture paraissent envisageables. Il en est de même pour le soudage de deux pièces entre elles, permettant aux composites de s'affranchir des problématiques de collage et d'utilisation de rivets (cf. illustration ci-après).

Vitrimère PMMA



Vitrimère PEHD



Échantillons de deux polymères thermoplastiques PMMA — poly(methyl methacrylate) — et HDPE — high density polyethylen — modifiés en vitrimères et soudés l'un à l'autre (source : [Ademe](#), 2022).

Actuellement, les vitrimères développés présentent une contrainte maximale à la rupture comparable à celles de résines époxy commerciales mais un module en traction plus faible (cf. illustration ci-après).

|                                    | Module en traction (GPa) | Contrainte à rupture en traction (MPa) | Allongement la rupture |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| Epoxy SR 8500 / SD 1213 (Sicommin) | 2,6 – 2,9                | 49 – 57                                | 3,5 – 5,8              |
| PP homopolymère générique          | 1,2 – 1,9                | 29 – 40                                | 6,5 – 11,0             |
| Nylon 6 générique                  | 1,5 – 3,7                | 44 – 91                                | 1,5 – 7,5              |
| Vitrimère                          | 0,6 – 1,8                | 42 – 67                                | 3,0 – 9,8              |

Propriétés mécaniques des vitrimères comparées à celles d'autres polymères thermoplastiques ou thermodurcissables (source : [Ademe](#), 2022).

Ces dix dernières années, des études ont été menées afin d'amorcer la transition des réseaux thermodurcissables vers des réseaux vitrimères. Cette nouvelle classe de polymères se trouve dans

sa période de maturité où ses principaux enjeux permettant son entrée dans le domaine industriel sont encore à l'étude. Les vitrimères doivent notamment proposer des matières premières abordables, et surtout des procédés de fabrication et de mise en œuvre à grande échelle en utilisant des outils existants.

L'application à l'échelle industrielle se limite notamment quant à la cadence de production, inférieure à celle des composites conventionnels. Les vitrimères ont en effet des temps de relaxation plus lents que les résines thermodurcissables, du fait de la vitesse de réactions d'échanges entre les nœuds de réticulation. Cela a notamment pour effet de diminuer la cadence de production. La difficulté d'atteindre des échanges rapides, avec une viscosité assez faible et sans dégradation thermique, reste à ce jour une limitation considérable pour les applications industrielles. La baisse de viscosité et le thermoformage avec une bonne imprégnation des renforts est généralement atteinte pour des températures avoisinant les 200 °C, ce qui implique une éventuelle dégradation thermique de la matrice et donc une diminution des propriétés du matériau.

À titre indicatif, la société [Mallinda](#) située à Denver (Colorado, États-Unis) a commencé à appliquer les vitrimères aux composites de manière industrielle, avec la fabrication de résines réactives ou de préimprégnés (cf. résine Vitramax).

### Polymères autorenforcés (Self-Reinforced Polymers)

Il convient également de mentionner les composites autorenforcés à matrice thermoplastique SRP (Self-Reinforced Polymers) : ces composites polymères autorenforcés — également appelés plastiques autorenforcés ou composites polymères simples — sont des matériaux composites renforcés de fibres, le renfort fibreux de ces matériaux étant une version hautement orientée du même polymère à partir duquel la matrice est fabriquée.

Ce [document](#) un peu ancien (2006, mis en ligne en décembre 2021), élaboré par le National Composites Network ([NCC](#), Royaume-Uni) et constituant un guide des bonnes pratiques en matière d'options de fin de vie pour les déchets composites, mentionne la possibilité de fabriquer des composites à base de monomatériaux. Les auteurs citent le cas du polypropylène (PP) — employé abondamment dans l'industrie automobile — qui pourrait être utilisé comme matrice renforcée de fibres de PP haute performance (self-reinforced PP), pour produire un composite 100 % PP entièrement recyclable.

Cette autre [publication](#) (2021), émanant de l'université technique du Danemark DTU (Danmarks Tekniske Universitet) et portant sur la gestion durable de la fin de vie des pales d'éoliennes, rapporte les résultats de travaux de recherche et développement de composites autorenforcés à base d'acide polylactique (PLA) biosourcés, combinant une matrice PLA à faible point de fusion et rigidité élevée avec des fibres de renforcement PLA à haut point de fusion, toutes deux biodégradables. La chercheuse Justine Beauson (déjà citée plus haut) est coautrice de ces travaux. À consulter également, la [thèse](#) de Justine Beauson, ainsi que le [support](#) de sa soutenance de thèse (2022).

Dans cet [article](#) de juillet 2022, des scientifiques français — académique et industriels — étudient et comparent les propriétés spécifiques de traction de composites à matrice polyéthylène, renforcés par des fibres de verre, de carbone, de lin et de polyéthylène (composite monomatériau dans ce cas). Selon les chercheurs, les résultats sont en faveur d'une exploitation future du polyéthylène autorenforcé, en particulier dans le secteur des transports (automobile, aéronautique).

Ces travaux ont été présentés ([programme](#)) lors de la [conférence](#) internationale Matériaux 2022 qui s'est tenue en octobre 2022 à Lille (Hauts-de-France).

À titre indicatif, au sujet du polyéthylène, voir également cet [article](#) (2019 — en français) consacré à la caractérisation et la modélisation d'un composite polyéthylène autorenforcé.

Plusieurs études de marché relative aux polymères autorenforcés (cf. [MarkWide Research](#), [Transparency Market Research](#), etc.) indiquent qu'en fonction des applications, le marché des polymères autorenforcés concernent notamment les composants automobiles, les articles de sport, les bagages, les carters et boîtiers de machines, les conteneurs de transport, les revêtements industriels, etc. La demande de polymères autorenforcés est cependant plus élevée dans l'industrie automobile que dans les autres industries, le marché mondial des polymères autorenforcés étant tiré par la demande croissante de composants légers dans l'industrie automobile (France, Allemagne).

À noter que [Samsonite](#) utilise les polymères autorenforcés pour ses valises (matrice en PP renforcée de fibres également en PP).

---

Au terme de cette première partie consacrée au recyclage des pales (méthodes et procédés, matériaux), il est intéressant de revenir à l'IEA Wind Task 45 dont il a été question plus haut (cf. Étape 1, 2<sup>e</sup> partie, section Opérations de démantèlement des éoliennes, [Éoliennes terrestres](#), **Zoom sur les déchets de pales en matériaux composites**). L'IEA Wind Task 45 est dédiée au recyclage des pales d'éoliennes en fin de vie, dans les travaux menés par les experts de l'[IEA Wind TCP](#).

Lancée en mai 2021 pour une durée de 3 ans, l'objectif de l'IEA Wind Task 45 est d'élaborer un recueil des meilleures pratiques en matière de gestion des pales en fin de vie à destination des exploitants de parcs éoliens, ainsi que des conseils opérationnels pour le passage à l'échelle des processus de recyclage et la structuration de chaînes de valeur du recyclage à destination de l'industrie du recyclage. L'ensemble est attendu pour avril 2024.

En complément, il conviendra de consulter cette [présentation](#) de l'IEA Wind Task 45 par Justine Beauson, datée du 22 novembre 2022, lors de la [conférence](#) internationale sur les pales d'éoliennes durables (nouveaux matériaux, recyclage, perspectives), du 21 au 23 novembre 2022 à Roskilde (Danemark). La présentation citée, ainsi que le [programme](#) (cf. ci-après) de cette conférence permet d'identifier des spécialistes à même d'alimenter un pool d'experts sur la thématique de la présente étude RECORD. Le périmètre de cette conférence porte sur la durabilité des pales d'éoliennes, depuis la sélection des matériaux constitutifs jusqu'à la fin de vie et la phase de recyclage, en passant par leur fabrication :

- technologies et procédés de recyclage (réemploi, réutilisation, pyrolyse, solvololyse, etc.) ;
- applications pour les matériaux recyclés ;
- économie circulaire ;
- nouvelles résines polymères (biocomposites, thermodurcissables recyclables, résines biosourcées, fibres de carbone biosourcées, etc.) ;
- matériaux composites alternatifs et conception des pales ;
- innovations matériaux et recyclabilité ;
- gestion de la fin de vie et des déchets ;
- analyse de la fin de vie des pales ;
- sujets politiques et analyse du cycle de vie.

À propos des défis techniques et une proposition de feuille de route en matière de circularité et de durabilité des pales d'éoliennes, consulter cet [article](#) (2022) de Justine Beauson (voir les sections 4 et 5 dudit article). À la DTU (Danmarks Tekniske Universitet), voir également cet [article](#) de revue (2021) de Leon Mishnaevsky à propos des solutions actuelles et à venir en matière de gestion durable de la fin de vie des pales d'éoliennes.

## 2.2 - Les aimants permanents

### 2.2.1 - Méthodes et procédés de recyclage

Dans cette sous-partie, il s'agit de présenter les développements en cours concernant la séparation et le recyclage des terres rares contenues dans les aimants permanents des aérogénérateurs. Outre la réutilisation directe, les aimants permanents à base de terres rares peuvent être soumis à deux types de traitement (boucle courte, menant à la régénération de l'alliage magnétique ; boucle longue, aboutissant à l'extraction des terres rares par voie chimique) pour lesquels toutes informations disponibles et/ou accessibles sont apportées :

- le rendement de ces deux procédés ;
- la qualité métallurgique du recyclat obtenu ;
- les coûts d'équipements et de fonctionnement associés ;
- les impacts environnementaux connus ou prévisibles des procédés.

Selon cet [article](#) paru le 21 février 2022 dans Les Échos Planète à propos des terres rares, l'utilisation des terres rares dans l'éolien terrestre a marqué le pas malgré les avantages de l'aimant permanent, la flambée des coûts de ces matériaux en 2021 (la production dépend à 87 % de la Chine) a conduit les constructeurs à privilégier des alternatives. Seul l'éolien maritime recourt encore massivement à l'utilisation des terres rares. Cet [avis technique](#) (déjà cité plus haut) de l'Ademe, rendu en octobre 2020, anticipe un besoin de 463 tonnes annuelles en France dans l'hypothèse où 5,7 GW d'aérogénérateurs offshore seraient déployés — un chiffre à revoir à la hausse compte tenu de la [volonté politique](#) d'installer une cinquantaine de parcs offshore d'ici 2050, pour une capacité totale de 40 GW. Pour les auteurs de cet avis technique, hormis l'éolien (marin), aucune autre technologie de conversion des énergies renouvelables n'utilise les terres rares de manière significative. Outre les contraintes d'équilibre économique et les contraintes technologiques, pour ce qui concerne le recyclage des terres rares, ces auteurs notent surtout un manque de gisement concentré de taille industrielle disponible actuellement et sur au moins les 20 années à venir, qui permettrait d'envisager un déploiement économique des infrastructures de recyclage.

Dans cet autre [avis](#) (déjà cité plus haut) de l'Ademe paru en mars 2022, l'Agence de la transition écologique indique qu'à l'horizon 2050, suivant les scénarios prospectifs de l'Ademe, le besoin français pour trois éléments (néodyme, praséodyme et dysprosium) pour 47 GW d'éolien en mer pourrait représenter 1,7 % de la production actuelle mondiale de ces éléments. Selon l'Ademe, 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 alternatives (cf. infra, sous-partie Matériaux, à propos des solutions de substitutions aux terres rares dans les aimants permanents).

L'article de Les Échos Planète précise que dès 2019, l'État a travaillé à la sécurisation et à l'approvisionnement des matières stratégiques nécessaires à différents secteurs (aéronautique, défense, batteries, énergies renouvelables, etc.), avec l'initiative D3R qui vise la Déconstruction des parcs éoliens, le Reconditionnement des gros composants, le Recyclage des pales et la Revente des métaux, des matériaux recyclés et des composants (cf. Étape 1, 1<sup>re</sup> partie, section Devenir des éoliennes en fin de vie, § relatif à l'association AD3R). Dans ce contexte, un groupe de travail comprenant des consommateurs d'aimants permanents et des acteurs aptes à les recycler — entreprises (EDF, Renault, Veolia) et centres de recherches (CNRS, CEA) — a été réuni en 2020 sous la houlette de la Direction générale des entreprises (DGE). Dans l'article cité, Élodie Maxime-Lecleire, alors pilote de ce projet à la DGE, mentionne des travaux en cours à l'échelon ministériel (DGEC — Direction générale de l'énergie et du climat) « pour préparer la mise en place d'un recyclage systématique des aimants permanents » — voir infra, ce [document](#) édité en juillet 2022 par le Commissariat général au développement durable (CGDD).

Par ailleurs, lors de la présentation du plan France Relance en septembre 2020, le Premier ministre a annoncé le lancement de [stratégies d'accélération pour l'innovation](#), qui s'inscrivent dans le cadre du quatrième Programme d'investissements d'avenir (PIA4). L'une des 20 stratégies d'accélération retenues est dédiée aux [recyclages et à la réincorporation de matériaux recyclés](#). Le recyclage des terres rares s'inscrit de fait dans la [stratégie d'accélération](#) relative à la recyclabilité, au recyclage et à la réincorporation des matériaux recyclés.

Le sujet des terres rares est abordé dans ce [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 (déjà cité plus haut — cf. Étape 1, 1<sup>re</sup> partie, section Gisement des éoliennes en fin de vie, [Les parcs en fin de vie](#), § relatif

aux flux de terres rares). Pour mémoire, s'agissant de la récupération et le recyclage des aimants permanents et des terres rares des éoliennes terrestres en fin de vie, les quantités en 2030 sont très faibles, au regard des flux issus d'autres secteurs : 7,5 t de néodyme et 0,55 t de dysprosium (flux en en 2030). Mais les auteurs du rapport notent que « ces chiffres seront multipliés à terme par 40 pour les éoliennes offshore » et que « l'enjeu industriel, économique et écologique n'existe que si on prend en compte les éoliennes en mer, dont le démantèlement n'interviendra qu'à partir des années 2040 ».

### Réutilisation directe

La voie la plus simple de recyclage est la réutilisation directe des aimants en fin de vie, après reconfiguration et régénération de l'alliage, pour des usages similaires ou voisins. À titre indicatif, deux sociétés en Europe sont positionnées sur cette activité : l'entreprise industrielle allemande [Vacuumschmelze](#) et la société estonienne [NPM Silmet](#) (filiale du groupe américain [Neo Performance Materials](#)). Mais pour être rentable, cette activité nécessite la collecte organisée d'une grande quantité d'aimants de grande taille — hors équipements électriques et électroniques — à l'échelle européenne.

La R&D et innovation en matière de recyclage des aimants permanents fait l'objet d'un développement spécifique dans ce rapport.

Selon les auteurs du [rapport](#) du CGEDD/CGEIET de 2019 — citant une étude de marché publiée en novembre 2018 par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) sur le recyclage des aimants à base de terres rares —, le reconditionnement d'aimants usagés est économique à moyen terme (vers 2025), en particulier pour les aimants de grandes dimensions (typiquement 15 cm x 5 cm x 1 cm, à l'instar des aimants des aérogénératrices des éoliennes). La réutilisation directe est possible sous réserve que soient i) mis en place un cadre européen de collecte et de recyclage des aimants, pour disposer des quantités nécessaires, et ii) développés des procédés de retraitement adaptés (usinage économe en matières, car 20 à 30 % de la matière première est perdue dans les usines lors de la découpe des aimants ; protection contre l'oxydation par exemple par dépôts électrolytiques comme cela est pratiqué par le [Fraunhofer IPA](#) — Institut für Produktionstechnik und Automatisierung — ou par revêtement à base de résines époxy).

### Régénération de l'alliage

Cette approche est également appelée boucle courte.

Plusieurs procédés concurrents font l'objet d'investigations, notamment en France (cf. CEA-Liten > axe de recherche Économie circulaire > [Recyclage et chimie verte](#)) et en Allemagne (Fraunhofer-Gesellschaft > Institutes and Research Establishments in Germany > Fraunhofer IWKS > [Magnetic materials](#)).

Depuis une dizaine d'années, le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) travaille sur le recyclage des aimants pour sécuriser les approvisionnements en terres rares. Le [CEA-Liten](#) a ainsi [démontré](#) dès 2015 qu'il est possible de produire des aimants présentant des performances comparables à ceux du commerce en utilisant jusqu'à 25 % de matière recyclée.

Les chercheurs du CEA-Liten ont utilisé le recyclage par voie sèche, consistant à broyer les aimants en fin de vie — ou les rebuts de fabrication — et à réinjecter la poudre ainsi obtenue dans le procédé standard. En optimisant les paramètres de la phase de broyage, ils ont obtenu une poudre homogène (grains de 5 microns en moyenne) qu'ils ont mélangée en différentes proportions avec de la poudre vierge sous atmosphère contrôlée, pour la préserver du risque d'oxydation. Après frittage, ils obtiennent une densification complète et des propriétés magnétiques quasi équivalentes (< 3 % de perte) à un aimant fabriqué à partir de poudre vierge, et ce avec un quart de poudre recyclée. En principe, la poudre produite peut être mise en forme par injection, frittage ou fabrication additive métallique.

La même année, le CEA-Liten a mis en service un four de fusion par strip-casting (coulée de bandes) au sein de la plateforme [Poudr'Innov 2.0](#) dédiée à la métallurgie des poudres. [Poudr'Innov](#) est à même d'assurer toutes les étapes de développement d'aimants permanents de type NdFeB. Le CEA-Liten est doté d'équipements industriels spécifiques à la fabrication des aimants dans l'objectif de réduire, réutiliser et substituer les terres rares dans la composition de ces derniers. L'étape de préparation de la phase magnétique par coulée et solidification contrôlée de l'alliage (strip-casting) est parfaitement maîtrisée au CEA-Liten — étape clé à la base des performances magnétiques de l'aimant final. Le Liten est en mesure de réaliser des études sur des coulées de 15 à 20 kg,

représentatives pour les industriels désireux de travailler de nouveaux matériaux appauvris en terres rares, de valoriser des produits en fin de vie par des filières de recyclage en voie courte ou d'innover sur les machines électriques avec la fabrication additive d'aimants.

Avec sa plate-forme Poudr'Innov et sa ligne pilote couvrant la préparation des alliages jusqu'à la mise en forme par métallurgie des poudres, le CEA-Liten est partie prenante du projet [MAGNOLIA](#) (cf. infra, sous-partie Matériaux) — voir également cet [article](#) de Gérard Delette, ingénieur de recherche au CEA-Liten, expert en procédés & matériaux magnétiques pour l'énergie et la mobilité, paru dans la revue Clefs CEA n° 75, février 2023, page 35.

Au [Fraunhofer IWKS](#) (Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie), dont les recherches portent sur le recyclage des matériaux stratégiques et la mise en place d'une économie circulaire, le sujet des [matériaux magnétiques](#) est l'une des [compétences](#) clés de l'institut, en particulier sous l'angle du [recyclage des aimants permanents](#) — technologies pour le recyclage des aimants au rebut, des déchets de production et tous produits contenant des aimants, technologies de démontage des aimants des composants et appareils.

Considérant que la récupération de terres rares pures ou oxydes de terres rares à partir d'aimants permanents par extraction chimique est un processus énergétiquement et économiquement coûteux, le Fraunhofer IWKS privilégie de recycler l'alliage tel quel et se concentre sur des voies de recyclage pour conserver les alliages dans leur composition et retraiter le matériau pour la production d'aimants recyclés : recyclage par traitement à l'hydrogène (décrépitation) pour la production d'aimants frittés et à liant polymère, recyclage par fusion et refroidissement rapide pour la production d'aimants frittés, à liant polymère et déformés à chaud — le traitement des aimants via des méthodes biochimiques ([biolixiviation](#) — bioleaching) sont également à l'étude. Les poudres produites par décrépitation peuvent être mises en forme par injection, frittage ou fabrication additive métallique.

En Allemagne, des projets de recherche sur les substituts, les procédures de recyclage et la réutilisation des aimants pour réduire la dépendance aux importations sont menés depuis plusieurs années déjà, notamment :

- par l'institut de recherche Fraunhofer IGB (Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik) : projet phare « Critical Rare Earths » ([projet](#) sur 4 ans, de novembre 2013 à novembre 2017) ;
- par Siemens et l'université technique de Rhénanie-Westphalie RWTH (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule) d'Aix-la-Chapelle (Aachen) : projet « Rare Earth – Green Mining and Separation » ([projet](#) sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> janvier 2012 au 31 décembre 2015).

#### Extraction chimique des terres rares

Cette approche est également appelée boucle longue.

Un tel procédé est typiquement composé des opérations suivantes :

- lixiviation ou dissolution : mise en solution des différents métaux (terres rares) ;
- purification : séparation des différents métaux ou constituants ;
- électrolyse : récupération du métal voulu sous forme métallique.

Plusieurs voies de lixiviation des aimants permanents et de mise en solution des terres rares font l'objet d'investigations, par exemple : en solutions acides conventionnelles (CEA-Liten), à partir de chlore gazeux chauffé de 280 °C à 400 °C (BASF), en solutions au sein d'une matrice de magnésium liquide à haute température (CEA-Liten).

D'autres voies de traitement (électroréduction, biohydrométallurgie) ont été également mises en œuvre (Fraunhofer IPA) avec moins de succès. En ce qui concerne la purification, le projet [CYTER](#) a étudié un procédé d'extraction liquide-solide, en alternative aux procédés plus classiques d'extraction liquide-liquide. La startup [Ajelis](#) est issue de ce projet.

Outre-Atlantique, l'entreprise américaine [REEcycle](#), basée à Houston (Texas), a mis au point un [procédé](#) de recyclage breveté utilisant un solvant propriétaire, également breveté, pour extraire les terres rares (REE : rare-earth elements) des déchets, en particulier des aimants d'éoliennes démantelées.

Plus précisément, l'[invention](#) concerne « des procédés et des systèmes de récupération ou d'extraction d'éléments de terre rare dans des conditions douces consistant à soumettre un matériau comprenant un élément de terre rare à un milieu de cristallisation d'élément de terre rare dans des conditions solvothermiques suffisantes pour former des cristaux d'élément de terre rare capables d'une séparation et d'une purification par gravité ».

Les aimants sont préalablement broyés en fines particules, alors soumises à l'action du solvant de REEcycle, créant ainsi un mélange d'éléments de terres rares. Au cours de cette étape, le réactif dans le solvant dissout et cristallise les terres rares (présentes sous forme d'oxydes). Le processus nécessite une basse pression et des températures inférieures à 100 °C, ne laissant aucun déchet. Le mélange d'oxydes de terres rares est ensuite filtré et séparé par gravité, augmentant la pureté. Le milieu réactionnel restant est réutilisable plusieurs fois. Enfin, le concentré d'oxydes de terres rares est commercialisé aux clients de REEcycle, qui séparent et métallisent les oxydes pour créer de nouveaux aimants de type NdFeB.

Grâce son procédé, REEcycle affirme être en capacité de récupérer 15 des 17 éléments de terres rares, mais indique se concentrer sur seulement quatre d'entre eux, essentiels pour la fabrication des aimants NdFeB (néodyme, dysprosium, praséodyme, terbium). REEcycle revendique un taux de récupération de 99,8 % lors du recyclage d'aimants d'éoliennes à base de terres rares (notamment).

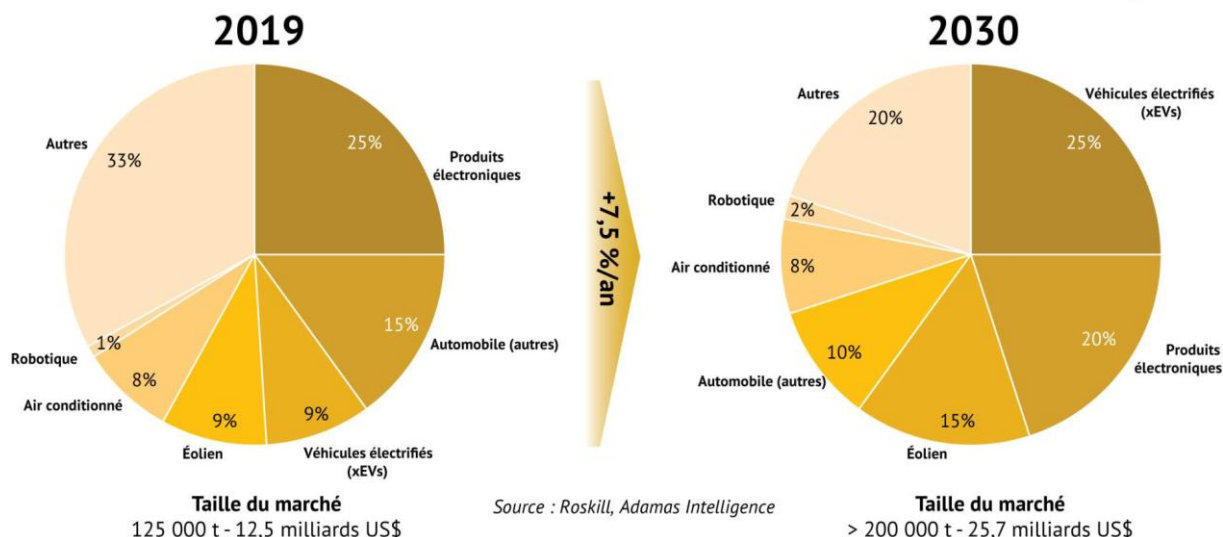
Au terme du chapitre consacré au recyclage des aimants permanents, les auteurs du [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 proposent la conclusion provisoire suivante : « Comme l'Europe ne réalise pas l'étape de conversion des oxydes de terres rares, cette opération étant effectuée presque exclusivement en Asie, une voie européenne de recyclage des aimants permanents avec production d'oxydes apparaît peu prometteuse compte-tenu des coûts actuels de production chinois ; elle n'aura d'intérêt économique que si les prix des terres rares atteignent des niveaux très élevés, et si des circuits de collecte et de traitements des aimants permanents sont organisés à grande échelle. Le recyclage direct, et la régénération des alliages sont les deux voies les plus pertinentes, tout particulièrement pour les aimants permanents de grande taille tels que ceux des éoliennes (plus de 600 kg d'aimants permanents par MW, selon cet [avis technique](#) de l'Ademe déjà cité plus haut). En Europe, il semble que, compte tenu des volumes disponibles, à ce jour encore faibles, il n'y ait la place que pour une ou deux unités industrielles de recyclage — contrairement à d'autres produits contenant des terres rares comme les ampoules fluorescentes, et les batteries NiMH (nickel-hydrure métallique), les aimants à base de terres rares sont peu collectés en tant que tels. »

Une conclusion que les auteurs du rapport du CGEDD/CGEJET réitèrent au terme de leur mission, formulant plusieurs recommandations, dont la recommandation n° 7 qui porte sur le « développement de la recherche et innovation pour améliorer le recyclage des aimants usagés »

Les aimants permanents à terres rares de la filière éolienne ne représentent qu'une faible part du marché français — 15 %, contre plus de 60 % dans les appareils électriques et électroniques (disques durs, haut-parleurs), près de 15 % dans les véhicules électriques et à hauteur de 10 % dans les scanners à résonance magnétique, mais les auteurs soulignent que sur les dernières années, les quantités utilisées dans les éoliennes (parcs offshore) et les véhicules électriques sont en augmentation par rapport à celles utilisées en électronique (remplacement des disques durs par les mémoires flash). La France ne réalisant pas l'étape de conversion des oxydes de terres rares, les voies industrielles les plus prometteuses sont la réutilisation des aimants permanents, leur régénération et la substitution ou la réduction de la teneur de terres rares. La recherche publique française — notamment le CEA-Liten — a développé des compétences de niveau international sur ces sujets.

En complément concernant l'utilisation des aimants permanents, cet [article](#) publié le 4 juillet 2022 sur le site Minéralinfo — portail français des ressources minérales non énergétiques, édité par le ministère de la Transition écologique et le BRGM — relatif au marché des terres rares en 2022 et aux filières d'approvisionnement en aimants permanents, indique que les principaux moteurs de la demande mondiale portée par les terres rares dites « magnétiques » pour aimants permanents Nd-Fe-B, progressant de près de 10 % par an, sont l'essor des véhicules électriques, de l'éolien off-shore, de l'électronique et de la robotique, des secteurs utilisant de grandes quantités d'aimants permanents. En termes de volumes, la plus forte augmentation de la demande est attendue dans le secteur des véhicules électrifiés, l'électronique occuperait la deuxième place, suivi du secteur éolien (cf. illustration ci-après).

## Évolution des secteurs d'utilisation des aimants permanents Nd-Fe-B



Évolution des secteurs d'utilisation des aimants permanents Nd-Fe-B entre 2019 et 2030 (source : [Minéralinfo](#), 2022).

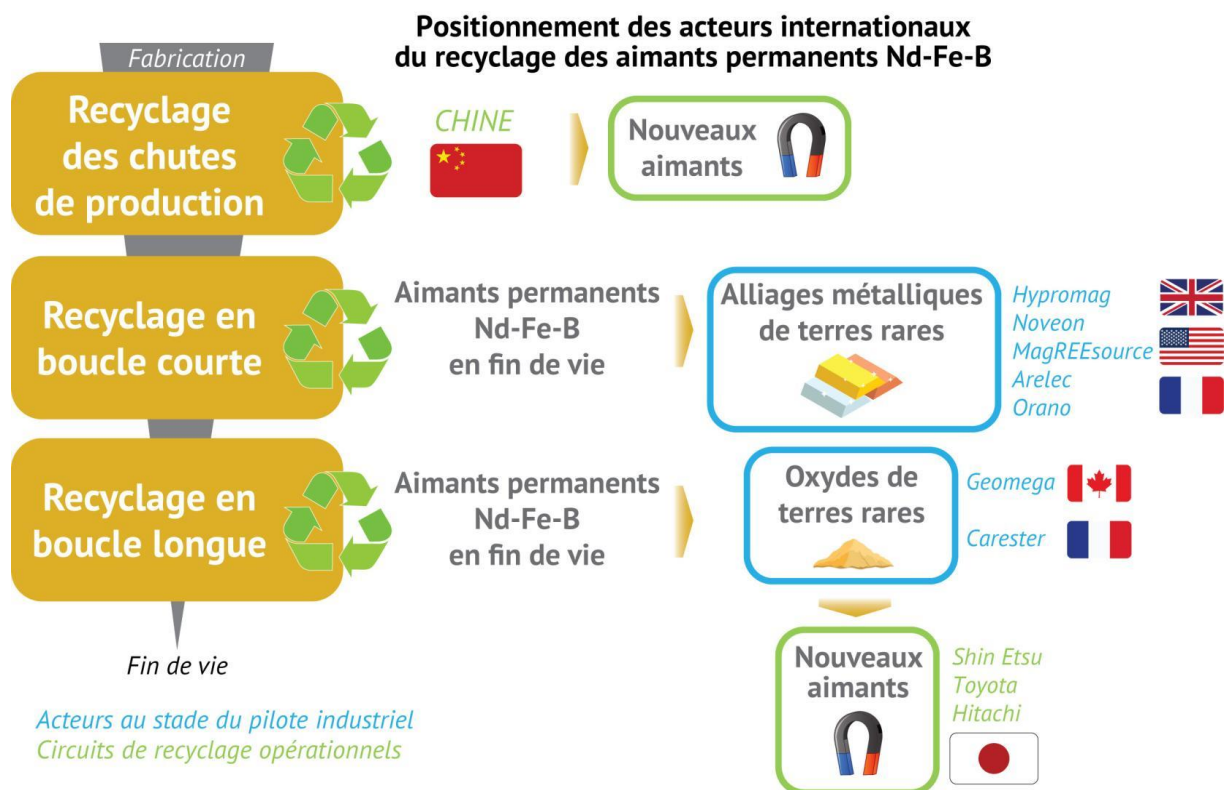
Concernant les enjeux de mettre en place une filière de recyclage des aimants permanents Nd-Fe-B en France, ce même [article](#) de Minéralinfo cite une étude menée en 2021 par la Direction générale des entreprises (DGE — mais étude non trouvée), qui a identifié 3 gisements les plus importants pourvoyeurs d'aimants permanents Nd-Fe-B à recycler sur le territoire national : les véhicules électriques et hybrides, les éoliennes en mer et les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

À propos des sources secondaires et du recyclage des terres rares, les auteurs de ce [document](#), édité en juillet 2022 par le Commissariat général au développement durable (CGDD), intitulé « L'éolien et les moteurs pour véhicules électriques : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles » et produit dans le cadre du Plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone, notent qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas de filière structurée de recyclage des aimants permanents et que moins de 1 % — selon les entreprises auditionnées — des aimants usagés sont probablement recyclés.

Deux principales possibilités existent pour recycler les aimants permanents, rappellent ces auteurs :

- la boucle courte, dite « magnet-to-magnet », dans laquelle les aimants usagés sont broyés pour obtenir une poudre d'alliage magnétique, qui peut être réutilisée pour fabriquer de nouveaux aimants permanents (voir partie III.C dudit rapport, page 72, sur le passage des alliages aux aimants permanents) : l'avantage de cette voie est d'être bien adaptée au recyclage d'aimants de taille importante de composition homogène et la chimie associée est peu nocive sur le plan environnemental — mais cette voie s'accompagne de potentielles pertes de performance ;
- la boucle longue, dans laquelle les aimants sont broyés, puis des traitements permettent d'obtenir des oxydes purs de terres rares : l'avantage est de permettre de s'adapter aux évolutions technologiques, notamment en cas d'évolution des proportions des différents composants des alliages magnétiques mais l'inconvénient est qu'il existe peu d'entreprises européennes capables d'utiliser les oxydes ainsi récupérés, qui risquent d'être exportés en Chine (le recyclage en boucle longue semble y être la voie majoritaire choisie par les industriels, essentiellement pour les chutes de production) — par exemple, l'entreprise allemande Vacuumschmelze, principal fabricant européen d'aimants permanents à terres rares frittés, importe des alliages de terres rares et non des oxydes pour sa fabrication d'aimants permanents.

Le schéma ci-après présente les principaux projets en phase de pré-industrialisation et leur positionnement entre les modèles de boucles courte et longue. Comme l'illustre le cas français, ces deux modèles ne s'opposent pas, n'ayant pas les mêmes sources ni les mêmes débouchés, et pourraient donc s'intégrer de manière complémentaire (cf. illustration ci-après).



Positionnement des acteurs internationaux du recyclage des aimants permanents Nd-Fe-B (source : [Minéralinfo](#), 2022).

Pour mémoire, deux grands types d'aimants NdFeB existent : les aimants frittés, qui représentent environ 90 % de la production, et les plasto-aimants ou aimants liés (par des résines thermodurcissables ou thermoplastiques), qui sont plus rarement utilisés. L'entreprise française [Arelec](#) à Lons (Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine) est un des rares producteurs d'aimants liés — Arelec s'est associée avec la startup [REEFine Technologies](#), implantée à Lyon, dans le cadre d'un projet d'atelier pilote de production de poudres coercitives anisotropes à partir de contenants cosmétiques, de produits domotiques et de petits moteurs électriques. Pour les éoliennes, les aimants permanents sont des aimants frittés pouvant atteindre 1 m de long, dont le maniement est difficile et dangereux. Le transport se fait principalement en train et par bateau, avec des emballages spéciaux. Ce transport est parfois difficile en raison des interactions magnétiques avec l'environnement (avions, radios, etc.), il semble donc intéressant d'avoir les sites de production proches des sites d'exploitation éolien ou de simplifier les procédés de montage/construction. L'alternative est de livrer les aimants non aimantés que le client aimante après le montage, mais cela est difficile pour les grosses génératrices. Dans ce cas il faut des machines spéciales pour monter les blocs aimantés.

Toujours selon ce même [rapport](#) du CGDD, la R&D en France est énormément tournée vers les applications de recyclage, ainsi que sur la réduction des quantités de terres rares nécessaires (cf. infra, sous-partie Matériaux). En France, le CEA et le BRGM ont des procédés intéressants, tant sur le plan industriel qu'environnemental à proposer. L'entreprise [Carester](#) réunit l'ensemble de l'expertise et du savoir-faire dans le raffinage des terres rares (voir encadré ci-après).

#### **Carester**

L'activité de Carester est centrée sur la définition de procédés pour le compte d'entreprises minières et juniors pour l'extraction et/ou la purification des terres rares. Le recyclage fait partie des champs couverts par l'entreprise, notamment en boucle longue. Selon Carester, le procédé de recyclage en boucle longue développé par l'entreprise ne serait pas plus cher que les procédés liés à la ressource primaire, mais avec l'avantage d'être moins polluant, tant en consommation d'eau qu'en rejets de CO<sub>2</sub>. Carester affirme en effet avoir mis au point un procédé permettant de réduire de 30 % les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à l'existant et de faire en sorte qu'il n'y ait pas d'effluents liquides, ce qui limite les risques de pollution. Une unité de recyclage conçue par Carester pourrait entrer en production en 2024 (démonstrateur industriel à Lacq) et serait la première unité de production de terres rares lourdes en dehors de la Chine. Ce projet, appelé Caremag (modèle de la boucle longue),

prévoit une production nominale (qui pourrait être doublée) de 320 tonnes d'oxydes de terres rares par an, qui permettront à terme la production de l'ordre de 1 000 t d'aimants permanents en fin de vie par an avec environ 30 % de la masse des aimants en néodyme, praséodyme, dysprosium et terbium. La montée en régime se fera sur trois ans, la principale contrainte actuellement identifiée étant celle des approvisionnements en intrants, particulièrement en aimants permanents usagés. Caremag vise principalement le marché de l'automobile.

L'entreprise [MagREEsource](#) propose également une solution de recyclage en boucle courte (voir encadré ci-après).

### **MagREEsource**

MagREEsource est un spin-off de l'[Institut Néel](#) (CNRS Grenoble), qui a développé un business model dit « Magnet-to-Magnet ». Avec la licence exclusive du savoir-faire de l'Institut Néel sur la décrépiation à l'hydrogène, MagREEsource a breveté un procédé de recyclage (boucle courte) des déchets d'aimants à base de terres rares pour obtenir une poudre d'aimants, qui va ensuite être réutilisée directement par fabrication additive ou frittage haute performance pour obtenir de nouveaux aimants personnalisés selon les demandes des clients. Ainsi les déchets d'aimants issus du démantèlement d'éoliennes à travers l'Europe peuvent servir à refabriquer des aimants en Europe grâce à ce modèle d'économie circulaire en boucle courte, économique et efficiente, et participer à la création d'une filière métallurgique souveraine.

À consulter, cet [article](#) paru le 25 avril 2023 dans Les Échos.

Experts : [Sophie Rivoirard](#), ex-chercheuse à l'[Institut Néel](#) (CNRS Grenoble), cofondatrice et directrice technologie & produit de [MagREEsource](#) ; [Daniel Fruchart](#), ex-chercheur à l'Institut Néel, conseiller scientifique de MagREEsource.

Néanmoins, indiquent les auteurs du rapport du CGDD, le recyclage ne permettra pas de subvenir aux besoins croissants d'aimants permanents. En effet, la forte croissance du marché ne pourra pas être absorbée, même par le recyclage de l'ensemble des aimants usagés. Par ailleurs, un obstacle important au recyclage à grande échelle est celui de l'extraction des aimants, notamment dans les véhicules usagés (moteurs de la direction assistée, moteurs de traction des voitures, vélos, trottinettes, etc.). Cette extraction est difficile, notamment en raison de la diversité des technologies, et limite les chances d'être rentable face à la production primaire. Il faut également désaimanter les aimants avant de procéder à leur recyclage, ce qui peut être une étape délicate. Une certaine standardisation des produits, notamment dans les véhicules électriques permettrait une plus grande automatisation et faciliterait le recyclage. Il est cependant difficile d'évaluer la quantité d'aimants qu'il serait possible de produire à partir du recyclage, probablement pas plus de 10 à 15 % des besoins français à l'horizon 2030. En France, la société Carester peut mettre en place des procédés de recyclage propres. La société [Daimantel](#) peut quant à elle préparer les aimants usagés pour leur transport et leur recyclage, et ainsi faciliter l'étape critique de leur collecte et de leur démantèlement (voir encadré ci-après).

### **Daimantel**

Daimantel France (cf. infra, sous-partie Matériaux, à propos du projet MAGNOLIA) est implantée en Moselle et propose des services de sécurisation des stocks, de collecte et de démantèlement des aimants permanents à base de terres rares. La société propose notamment des services de démagnétisations et de traitements des aimants permanents usagés, qui peuvent ensuite être injectés dans une boucle de recyclage. Les étapes de collecte et de préparation des systèmes contenant les aimants permanents usagés seront déterminants pour permettre la bonne alimentation des entreprises de recyclage.

Le rapport du CGDD mentionne également le projet VALOMAG (VALOrisation of MAGnets), mené par Suez, le BRGM et le CEA- Liten avec d'autres acteurs européens. Ce projet vise le recyclage d'aimants permanents issus des turbines éoliennes, de moteurs électriques et de déchets électroniques, tant par des boucles courtes qu'en boucle longue selon les compositions et la qualité des aimants collectés (cf. infra, sous-partie Matériaux, à propos du programme H2020).

Enfin, le rapport du CGDD cite les projets [SinterMagRec](#) (recyclage d'aimants NdFeB par frittages non conventionnels) et [RECVAl-HPM](#) (récupération d'aimants permanents contenus dans les déchets électroniques), deux projets soutenus par les investissements d'avenir et l'ANR.

Selon les auteurs de cet [article](#) (déjà cité plus haut) publié le 4 juillet 2022 sur le site Minéralinfo, les usines de recyclage des aimants permanents Nd-Fe-B sont pour l'heure principalement localisées en Chine et au Japon. Au Japon les filières se sont structurées dès les années 2010, en ciblant la récupération en fin de vie des appareils commercialisés par les utilisateurs de terres rares eux-mêmes (équipements électroniques, compresseurs des climatiseurs, etc.). Les principaux acteurs sont Hitachi, Shin-Etsu, Shōwa Denkō, Mitsubishi Materials, Toyota Tsusho. En 2020, Hitachi estimait que les filières de recyclage mises en place par le groupe contribuaient à 10 % de leur approvisionnement en aimants permanents. Selon Hitachi, cela correspond depuis 2013 à 26 tonnes de terres rares obtenues après recyclage. En Chine, les activités de recyclage portent sur les chutes et rebuts de production d'aimants permanents (scrap).

Dans le reste du monde, les initiatives se multiplient les plus visibles étant nord-américaines et européennes : [Géoméga](#) au Canada, [Noveon Magnetics](#) (anciennement Urban Mining Company) aux États-Unis, [Hypromag](#) au Royaume-Uni et, en France, [Carester](#), [MagREEsources](#), [Orano](#) et Arelec (cf. supra).

Les auteurs du [rapport](#) du CGEDD/CGEJET de 2019 se sont notamment appuyés sur une note du CEA-Liten transmise à la mission, portant sur le recyclage des aimants permanents. Les 4 pages de ce document sont reproduites intégralement en annexe (cf. section 4.1).

**Synthèse des méthodes et procédés de recyclage les plus avancés des aimants permanents à base de terres rares (hors écoconception et mise en œuvre de matériaux innovants).**

| Typologie aimants                         | Méthode/procédé/technologie de recyclage                       | Maturité technologique, industrialisation | Coût, viabilité économique                                                                       | Gisements, disponibilité/accessibilité, volumes    | Débouchés des recyclats, marchés | Impacts/risques environnementaux/sanitaires (RSE)                                      |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Aimants permanents à base de terres rares | Réutilisation directe après reconditionnement d'aimants usagés | Industrialisation                         | Économique à moyen terme (2025+) si collecte à grande échelle et procédés de retraitement ad hoc | Gisement concentré de taille industrielle en 2040+ | n. d.                            | Enjeux environnementaux/sanitaires avec le démantèlement des éoliennes en mer en 2040+ |
| Aimants permanents à base de terres rares | Boucle courte par régénération de l'alliage                    | Non mature                                | Non rentable à ce jour                                                                           | Gisement concentré de taille industrielle en 2040+ | n. d.                            | Enjeux environnementaux/sanitaires avec le démantèlement des éoliennes en mer en 2040+ |
| Aimants permanents à base de terres rares | Boucle longue par extraction chimique des terres rares         | Non mature                                | Non rentable à ce jour                                                                           | Gisement concentré de taille industrielle en 2040+ | n. d.                            | Enjeux environnementaux/sanitaires avec le démantèlement des éoliennes en mer en 2040+ |

## 2.2.2 - Matériaux

Dans cette sous-partie, il s'agit de présenter les principales avancées des travaux de recherche portant sur l'opportunité de remplacer les terres rares — des matériaux stratégiques, voire critiques — dans les aimants permanents ou d'en réduire la teneur.

À propos de la substitution des aimants permanents, les auteurs de cet [article](#) du 23 novembre 2020 (déjà cité plus haut, cf. étape 1, 1<sup>re</sup> partie, section Inventaire des matières à valoriser) rappellent qu'il existe deux grandes familles de chaîne de conversion électromécanique :

- celles à entraînement direct (la liaison mécanique entre la turbine éolienne et la génératrice est directe) et dans ce cas la machine utilisée est obligatoirement synchrone avec un grand nombre de paires de pôles (rotor bobiné — machines synchrones à électroaimants — ou à aimants permanents) ;
- à multiplicateur de vitesse, permettant une vitesse de rotation de l'arbre beaucoup plus élevée que celle de la turbine (machines asynchrones).

Comme l'indique cet [article](#) du site Décrypterlenergie.org (une initiative de l'association [négaWatt](#)), publié le 19 novembre 2019 et modifié le 14 juin 2021, relatif à l'impact de la rareté de certains métaux sur le développement des énergies renouvelables, il existe plusieurs alternatives aux terres rares :

- générateurs sans aimants permanents (génératrices asynchrones ou génératrices synchrones à excitation bobinée) qui ne contiennent pas de terres rares ;
- générateurs à aimants permanents avec multiplicateur de vitesse qui contiennent jusqu'à 85 % de terres rares en moins par rapport aux générateurs à aimants permanents à entraînement direct ;
- aimants permanents sans terres rares (ferrite), mais qui s'avèrent moins performants.

S'agissant de la substitution ou de la réduction des terres rares dans les aimants permanents, les auteurs du [rapport](#) du CGEDD/CGEIET de 2019 — citant une étude de marché publiée en novembre 2018 par le CEA sur le recyclage des aimants à base de terres rares —, indiquent d'importants efforts de R&D sont déployés dans le monde pour trouver des substituts aux terres rares entrant dans la composition des aimants permanents ou pour en réduire la teneur, plutôt que pour promouvoir le recyclage des aimants. Si cette approche devait connaître le succès, elle pourrait affecter l'intérêt des industriels à long terme de chercher à réutiliser les aimants permanents contenant des terres rares ou à en extraire les terres rares.

Par exemple, des travaux sont menés avec des industriels pour réduire la teneur des terres rares dans les aimants, notamment en les localisant aux joints de grains. Ainsi le CEA (CEA-Liten) travaille sur un procédé de mélange de poudres métalliques et de frittage favorisant la diffusion du dysprosium pour la production d'aimants épais. Sans le nommer, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET font référence au projet MAGNOLIA.

Démarré en avril 2022 pour une durée de 3 ans, le projet [MAGNOLIA](#) (MAGNets on pilOt Line Ambition — cf. illustration ci-après) a pour ambition de structurer en France un outil industriel de recyclage et de fabrication d'aimants permanents frittés Neodyme-Fer-Bore haute performance, pour initier une filière nationale souveraine et compétitive. Ce projet fédère un consortium constitué de cinq partenaires — outre le CEA-Liten : [Orano](#), porteur du projet (traitement et recyclage des combustibles nucléaires usés), [Valeo](#) (équipementier automobile), [Paprec](#) (collecte et recyclage des déchets), [Daimantel](#) (collecte et démagnétisation des aimants permanents).

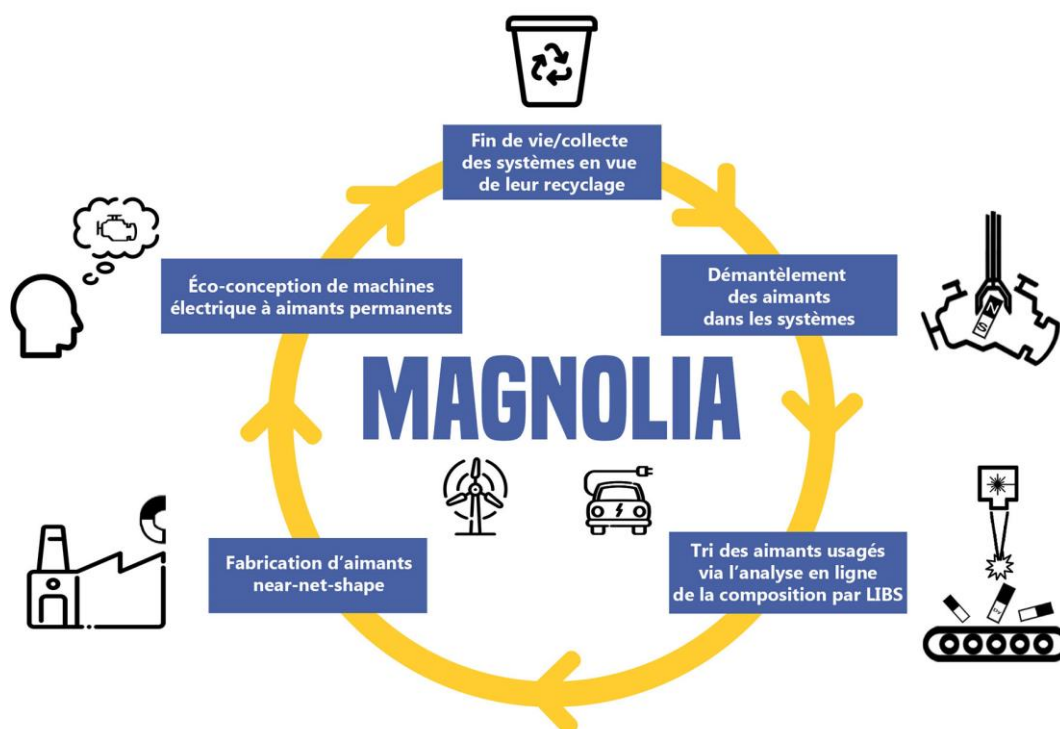
Le projet MAGNOLIA est structuré autour de quatre [axes](#) :

- le développement de technologies innovantes de fabrication d'aimants frittés en France et leur déploiement sur des lignes de fabrication pilote et préindustrielles ;
- l'élaboration d'un schéma de sécurisation des approvisionnements et de la production d'aimants hors Asie ;
- la préparation en France d'une filière compétitive de collecte, démantèlement et valorisation des moteurs électriques ;
- la réduction de l'impact environnemental (en lien avec la présente étude RECORD) : recyclage d'aimants, réduction des déchets de fabrication, valorisation des terres rares,

écoconception de machines électriques facilitant le démantèlement des moteurs et la récupération des aimants.

Dans le cadre du projet MAGNOLIA, le CEA-Liten a plus spécifiquement en charge d'étendre à une capacité de 4 tonnes l'atelier pilote existant sur sa [plateforme](#) dédiée à la métallurgie des poudres et de développer et monter en maturité des briques technologiques visant à réduire ou substituer la quantité de matières premières critiques utilisées pour la fabrication des aimants :

- utilisation plus efficace des matières premières critiques :
  - o enrichissement en terres rares lourdes aux joints de grains par mélange poudre à poudre, permettant de réduire la quantité de terres rares lourdes (dysprosium, terbium — par opposition aux terres rares légères comme le néodyme ou le praséodyme) utilisées tout en conservant les propriétés magnétiques,
  - o substitution du néodyme par le cérium, une terre rare abondante et dix fois moins onéreuse que le néodyme ;
- optimisation de procédé de mise en forme pour améliorer les rendements matières :
  - o fabrication d'aimants à la forme (« near-net-shape ») par injection de poudre (Powder Injection Molding), permettant de réduire les étapes d'usinage responsables de 20 à 30 % de pertes matières ;
- intégration de l'économie circulaire :
  - o tri des aimants usagés en entrée du procédé de recyclage via le développement par la direction des énergies du CEA de l'analyse en ligne des aimants par LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy),
  - o recyclage d'aimants frittés usagés par une voie poudre innovante permettant de valoriser les aimants riches en terres rares lourdes (cf. sous-partie Méthodes et procédés),
  - o contribution à l'écoconception de machines électriques plus performantes et favorisant le démantèlement.



Le projet MAGNOLIA (source : [CEA-Liten](#), 2022).

Autre exemple cité par les auteurs du rapport du CGEDD/CGEIET, le projet NOVAMAG (NOVel, critical materials free, high Anisotropy phases for permanent MAGnets, by design), un projet mené dans le cadre du programme H2020 portant sur le développement de nouvelles compositions d'aimants appauvris voire sans terres rares.

Horizon 2020 (H2020) était le programme-cadre européen pour la recherche et le développement (PCRD) pour la période 2014-2020. Le portail des offres et financements « [Funding & Tenders portal](#) » (cf. infra) permet d'identifier et de caractériser le projet NOVAMAG :

- [NMP-23-2015](#) :
  - o thématique : nouveaux matériaux conçus pour remplacer les matériaux critiques,
  - o date d'ouverture : 22 octobre 2014,
  - o date de clôture : 26 mars 2015 et 8 septembre 2015,
  - o projet financé :
    - [NOVAMAG](#) (projet sur 3,5 ans, du 1<sup>er</sup> avril 2016 au 30 septembre 2019).

Au titre du programme H2020, il convient également de mentionner le projet SUSMAGPRO (Sustainable Recovery, Reprocessing and Reuse of Rare-Earth Magnets in a Circular Economy), qui a pour objectif de développer une chaîne d'approvisionnement pilote à partir d'aimants en néodyme recyclés en Europe. Le portail des offres et financements cité ci-avant permet d'identifier et de caractériser le projet SUSMAGPRO :

- [CE-SC5-07-2018-2019-2020](#) :
  - o thématique : matières premières innovantes pour l'économie circulaire (processing durable, réutilisation, recyclage et valorisation),
  - o date d'ouverture : 07 novembre 2017 (resp. 14 novembre 2018),
  - o date de clôture : 27 février 2018 et 4 septembre 2018 (resp. 19 février 2019 et 4 septembre 2019),
  - o projet financé :
    - [SUSMAGPRO](#), relatif aux nouvelles technologies (hydrogène) pour le recyclage des aimants au néodyme ([projet](#) sur 4,5 ans, du 1<sup>er</sup> juin 2019 au 30 novembre 2023).

En lien avec H2020, il convient de mentionner aussi le projet [VALOMAG](#) (VALOrisation of MAGnets), démarré en février 2020 et pour une durée de 3 ans, qui a bénéficié d'un financement de l'Institut européen d'innovation et de technologie [EIT](#) (European Institute of Innovation and Technology) dans le cadre d'[EIT RawMaterials](#), partie intégrante du programme Horizon 2020. Ce projet — visant la récupération d'aimants usagés pour la production de nouveaux aimants et oxydes de terres rares — a été [présentée](#) par Virginie Decottignies, responsable du département Recyclage avancé au Centre international de recherche sur l'eau et l'environnement (Cirsee) de Suez, lors d'un [workshop](#) consacré à la circularité grâce à des matériaux innovants et des technologies de recyclage, que la plate-forme européenne de technologie et d'innovation pour l'énergie éolienne [ETIPWind](#) (European Technology and Innovation Platform on Wind Energy) a organisé le 4 mai 2021 avec le soutien du GT [Sustainability](#) de WindEurope. Côté français, le BRGM et le CEA-Liten sont également parties prenantes de ce projet.

Le programme Horizon Europe succède au programme Horizon 2020. Le portail des offres et financements « [Funding & Tenders portal](#) » est le portail unique pour les participants à de nombreux programmes de financement de la Commission européenne, dont Horizon Europe, le programme de financement européen dédié à la recherche et à l'innovation pour la période 2021-2027. Ce portail permet notamment de rechercher des opportunités de financements, télécharger les documents officiels et soumettre et gérer des projets. Le moteur de recherche de cette plateforme permet d'identifier et de caractériser le projet REEPRODUCE, en lien avec la présente étude RECORD :

- [HORIZON-CL4-2021-RESILIENCE-01-04](#) :
  - o thématique : développement de matières premières climatiquement neutres et favorables à l'économie circulaire,
  - o date d'ouverture : 22 juin 2021,
  - o date de clôture : 23 septembre 2022,
  - o projets financés :

- [REEPRODUCE](#), relatif au démantèlement et recyclage des terres rares des produits en fin de vie ([projet](#) sur 4 ans, du 1<sup>er</sup> mai 2022 au 30 avril 2026).

Plusieurs autres projets européens ont été identifiés, en particulier :

- Reco2Mag :
  - le projet [Reco2Mag](#) (en cours) vise à optimiser les microstructures des aimants permanents via un nouveau traitement des joints de grains (par électrophorèse), afin de produire des aimants permanents de type NdFeB frittés économes en ressources avec une teneur en dysprosium réduite,
  - projet sur 3 ans (1<sup>er</sup> janvier 2022 au 31 décembre 2024), financé dans le cadre d'[EIT RawMaterials](#) ;
- INSPIRES :
  - le projet [INSPIRES](#) (INtelligent and Sustainable Processing of Innovative Rare-Earth magnetS) vise à récupérer des terres rares grâce à des méthodes innovantes dans le recyclage des aimants permanents en se concentrant sur les appareils électroménagers — l'un des gisements les plus facilement disponibles/accessibles,
  - projet sur 3 ans (1<sup>er</sup> janvier 2021 au 31 décembre 2023), financé dans le cadre d'[EIT RawMaterials](#) ;
- MaXycle :
  - le projet [MaXycle](#) (terminé) visait à rendre le recyclage des aimants à base de terres rares plus respectueux de l'environnement,
  - projet sur 3 ans (1<sup>er</sup> mai 2018 au 30 avril 2021), financé dans le cadre d'[ERA-MIN 2](#) ;
- REE4EU :
  - le projet [REE4EU](#) (terminé) visait à développer un procédé (extraction par liquide ionique, concentration par électrolyse à haute température) pour la récupération et la réutilisation des terres rares,
  - projet HORIZON 2020 sur 4 ans (1<sup>er</sup> octobre 2015 au 30 Septembre 2019), financé dans le cadre de [SPIRE-07-2015](#) (Recovery technologies for metals and other minerals).

Les auteurs du rapport du CGEDD/CGEJET mentionnent également l'entreprise britannique GreenSpur Renewables ([GreenSpur Wind](#)) qui développe une génératrice synchrone à aimants permanents en remplaçant les terres rares par de la ferrite.

GreenSpur Wind a en effet le premier industriel à développer une génératrice synchrone à aimant permanent à base de ferrite (matériau ferromagnétique), sans terres rares (cf. illustration ci-après).



Aimants permanents à base de ferrite, équipant une génératrice synchrone (source : GreenSpur Wind, 2020).

Cette technologie de générateur à aimant permanent sans terres rares a notamment été [présentée](#) par Andrew Hine, directeur commercial chez GreenSpur Wind, lors d'un [workshop](#) consacré à la circularité grâce à des matériaux innovants et des technologies de recyclage, que la plate-forme européenne de technologie et d'innovation pour l'énergie éolienne [ETIPWind](#) (European Technology and Innovation Platform on Wind Energy) a organisé le 4 mai 2021 avec le soutien du GT [Sustainability](#) de WindEurope. GreenSpur Wind y indiquait que la première conception du générateur était plus lourde que les générateurs synchrones à aimants permanents — les aimants en ferrite n'ayant alors qu'un tiers de la force magnétique des aimants à base de terres rares.

Greenspur Wind avait déjà testé avec succès en 2019 un prototype de génératrice de 250 kW avec aimants permanents à base de ferrite mais le poids de ces machines s'avère excessif. Mais le 27 juillet 2022, [GreenSpur Wind](#) et l'américain [Niron Magnetics](#) ont [annoncé](#) avoir franchi une étape importante dans le développement d'un générateur sans terres rares destiné au marché des éoliennes offshore de grande puissance (jusqu'à 20 MW), en parvenant à mettre au point un générateur de 15 MW sans terres rares et aussi sans ferrite, dont la masse est réduite de 56 % par rapport à celle des concepts précédents développés par Greenspur Wind (avec ferrite). Les constructeurs ont opté pour une architecture à flux axial et non radial comme dans les génératrices équipant les turbines offshores existantes, mettant en œuvre la technologie Clean Earth Magnet de Niron Magnetics, à base de nitrure de fer. Une solution testée et validée par l'Offshore Renewable Energy Catapult ([ORE Catapult](#), déjà présenté plus haut).

Enfin, les auteurs du rapport du CGEDD/CGEJET citent les travaux du CEA-Liten, qui portent sur une économie de matière dans la mise en forme des aimants permanents, notamment grâce à la fabrication additive (cf. plateforme Poudr'Innov).

La question de la substitution aux terres rares dans les aimants permanents n'est pas nouvelle. Ainsi, dans cet [avis](#) (déjà cité plus haut) de l'Ademe paru en mars 2022, l'Agence de la transition écologique

mentionne, à propose du développement de solutions alternatives, cet article du chercheur néerlandais Claudiu C. Pavel :

- Claudiu C. Pavel et al., mai 2017, Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420717300077> :
  - o Face à la quasi-absence de publication sur le potentiel de substitution des terres rares utilisés dans les aimants permanents des génératrices éoliennes synchrones, cet article vise — pour la première fois — à évaluer les possibilités de substitution des terres rares dans les éoliennes et à analyser l'impact de cette substitution sur la demande de terres rares dans l'éolien. Les auteurs de l'article prennent également en considération la réduction de la quantité de terres rares.

À noter les deux articles ci-après, du même auteur :

- Claudiu C. Pavel et al., 2016, Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles, [https://publications.europa.eu/resource/ellar/7f3762be-aafe-11e6-aab7-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_2](https://publications.europa.eu/resource/ellar/7f3762be-aafe-11e6-aab7-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2)
  - o Les auteurs évaluent les options de substitution de neuf matériaux critiques (dysprosium\*, europium\*, gallium, germanium, indium, néodyme\*, praséodyme\*, terbium\*, yttrium\*) — dont 6 terres rares (\*) — dans trois technologies bas-carbone (éclairage, éoliennes, véhicules électriques), ainsi que la possibilité de réduire la demande pour ces matériaux dans la perspective de l'essor de ces technologies.
- Claudiu C. Pavel et al., janvier 2017, Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993716300641>
  - o Cet article concerne exclusivement la mobilité électrique — véhicules électriques, véhicules électriques hybrides, vélos électriques.

---

À un horizon encore lointain, comme le rapporte un article paru dans l'Usine Nouvelle (n° 3716, mars 2023, pages 12-13), la tétrataénite — un alliage météoritique de fer et de nickel doté de propriétés magnétiques remarquables grâce à sa structure cristallographique — pourrait remplacer les aimants permanents à base de terres rares. Ainsi, à la fin de 2022, deux équipes — l'une à l'université Northeastern de Boston (États-Unis) avec le soutien de l'U.S. Department of Energy, l'autre à l'université Cambridge (Royaume-Uni) — ont annoncé avoir mis au point un mode opératoire pour produire de la tétrataénite en laboratoire. De façon naturelle, la tétrataénite se forme dans les météorites grâce à un refroidissement très lent, passant de 500 à 60°C avec une vitesse de l'ordre d'un degré par million d'années. Mais ces recherches n'en sont qu'à leur début et il faudra bien compter 5 à 10 ans pour obtenir une tétrataénite de synthèse industrialisable, l'industrialisation à grande échelle pouvant prendre encore autant voire plus de temps.

### 3 - Conclusions et restitution des travaux (Étape 3)

#### 3.1 - Synthèse conclusive et perspectives

Un premier objectif de cette dernière étape est de produire une synthèse conclusive présentant les principaux enseignements de l'étude.

Les différents éléments de diagnostic et enseignements issus des travaux sont rassemblés dans une matrice SWOT, qui permet de visualiser les forces et atouts mobilisables (S, strengths) de l'écosystème entourant la fin de vie des éoliennes, les vulnérabilités et faiblesses à dépasser et surmonter (W, weaknesses), les opportunités à saisir (O, opportunities), ainsi que les menaces et risques auxquels l'écosystème doit faire face (T, threats).

Cette matrice SWOT permet notamment d'identifier les principaux freins et verrous à lever, les points de vigilance, les limites, etc., et ce, aussi bien au plan technique, économique, environnemental et réglementaire, concernant le développement, à court et moyen termes, du recyclage et de la valorisation des composants d'éoliennes. La matrice SWOT permet également de mettre en exergue certains points spécifiques encore insuffisamment couverts par les études existantes (par exemple traçabilité des composants des différents composants d'éoliennes en fin de vie).

À noter que dans une logique de structuration de filière (étapes clés : positionnement stratégique et vision prospective de la filière, orientations stratégiques, élaboration de scénarios prospectifs, animation d'ateliers de réflexion prospective thématique et géographique, détermination des leviers et pistes d'actions à même de jouer et réaliser les scénarios cibles, construction d'un plan d'actions, définition d'un schéma d'organisation et de gouvernance de la filière, ébauche d'une feuille de route, etc.), une lecture inversée de la matrice SWOT (« TOWS ») permet, en croisant les éléments de la matrice SWOT, de préciser/définir des orientations stratégiques possibles (leviers et pistes d'actions) dans une vision prospective de la filière (préconisations) :

- les opportunités à capter par la filière en jouant ses cartes maîtresses (croisement S x O) ;
- les menaces que la filière peut éviter grâce à ses atouts (croisement S x T) ;
- les faiblesses que la filière peut corriger en tirant parti d'un environnement porteur (croisement W x O) ;
- la stratégie à adopter pour minimiser les risques et surmonter les faiblesses (croisement W x T).

Pour mémoire, lors de la réunion de cadrage et de lancement de la présente action RECORD, le 6 octobre 2022, il avait été conclu, à propos de la manière d'orienter la fin de l'étude, que les travaux s'achèveraient par une synthèse où chacun s'approprie les conclusions. Pour autant, l'élaboration d'un plan d'actions et d'une feuille de route, dans une démarche de structuration de filière, apparaît comme une suite naturelle et complémentaire aux travaux réalisés. La mobilisation du pool d'experts constitué au fil des travaux (cf. fichier Excel « experts\_EoL\_WT.xlsx », annexé au présent rapport d'étude) apporterait un éclairage inédit.

Diagnostic – Matrice SWOT

|                                                  | Les moteurs, les atouts...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Les freins, les risques...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ... liés à la filière (origine intrinsèque)      | <p><b>Forces (S)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Gisement des éoliennes en fin de vie (matériaux hors pales et aimants)</u> – Les matériaux constitutifs des éoliennes sont recyclables et valorisables en quasi-totalité dans les filières françaises existantes.</li> <li>• <u>Gisement des éoliennes en fin de vie (pales principalement + capot nacelle et hub)</u> – Les gisements français de déchets de matériaux composites issus des éoliennes terrestres en fin de vie sont bien cartographiés, avec des volumes à même d'alimenter une filière de recyclage dès 2025 (la part de l'éolien dans les déchets de matériaux composites thermodurcissable va croissant) — idem pour les gisements à venir des déchets de matériaux composites issus des éoliennes marines (2040+).</li> <li>• <u>Écosystème (chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes complète)</u> – Des acteurs français de toutes tailles sont présents sur la plupart des maillons de la chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes (démantèlement, tri, transport et logistique post-démantèlement, réemploi, réutilisation, recyclage et valorisation).</li> <li>• <u>Matériaux innovants pour les pales (R&amp;D+)</u> – La France est présente/leader sur la résine thermoplastique Elium et le projet ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch) de pales d'éoliennes en composites thermoplastiques 100 % recyclables.</li> <li>• <u>Technologies et procédés de recyclage et valorisation des aimants et matériaux innovants pour les aimants (R&amp;D+)</u> – Expertises en France avec le CEA-Liten, quelques entreprises, le projet MAGNOLIA (MAGNets on piLOt LIne Ambition) surtout sur la boucle courte (« magnet-to-magnet ») menant à la régénération de l'alliage et la séparation métallique mais aussi sur la boucle longue menant à la séparation des terres rares — MAGNOLIA vise à structurer en France une filière industrielle de recyclage et de fabrication d'aimants permanents frittés Neodyme-Fer-Bore haute performance. La France est présente dans quelques grands programmes de recherche et développement européens Horizon 2020 (NOVAMAG — NOVel, critical materials free, high Anisotropy phases for permanent MAGnets, by design, VALOMAG — VALOrisation of MAGnets) mais pas Horizon Europe.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>Vulnérabilités (W)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Gisement des éoliennes en fin de vie (aimants permanents)</u> – Volumes très réduits des aimants permanents à base de terres rares pendant 20 ans car seules 5 % des éoliennes terrestres françaises en sont équipées et le démantèlement des éoliennes marines n'interviendra pas avant 2040 et la part de marché de l'éolien dans les aimants permanents à base de terres rares est de l'ordre de 15 % (enjeu industriel, économique et écologique n'apparaît que si on prend en compte les éoliennes en mer).</li> <li>• <u>Technologies et procédés de recyclage et valorisation des pales (incertitudes sur les capacités industrielles de recyclage)</u> – Les deux technologies les plus couramment employées (les plus matures et économiquement abordables/viables) sont le broyage mécanique fin (valorisation matière mais qualité des recyclats médiocre et débouchés limités) et l'incinération dans les cimenteries ou coprocessing (valorisation mixte matière et énergétique comme combustibles solides de récupération mais fibres de verre perdues et compétition avec d'autres filières utilisatrices de composites). Mais ces méthodes permettront seulement d'absorber les flux sortants des parcs éoliens durant la phase transitoire où ces flux sont encore limités (volumes, temporalité, synergies avec d'autres filières), préalablement à la structuration et l'industrialisation d'une filière de recyclage à proprement parler et selon un modèle économique adapté.</li> <li>• <u>Technologies et procédés de recyclage et valorisation des pales (R&amp;D-)</u> – La France est quasi absente des grands programmes de recherche et développement européens (Horizon 2020, Horizon Europe).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| ... liés à l'environnement (origine extrinsèque) | <p><b>Opportunités (O)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Cycle de vie des éoliennes (devenir des éoliennes en fin de vie)</u> – Extension de la durée de vie des éoliennes autant que techniquement possible et économiquement soutenable et allongement de la durée d'exploitation (prévention), reconditionnement et marché d'occasion et de pièces détachées (reuse/réemploi), nouveaux usages (repurpose/réutilisation et réaffectation) permettent de différer/temporiser les étapes de recyclage (recycling) et de valorisation (recovery) en évitant autant que possible élimination par incinération sans valorisation énergétique et/ou mise en décharge (disposal) mais ne peuvent absorber la totalité des éoliennes en fin de vie (=&gt; recyclage et valorisation à grande échelle sont inéluctables).</li> <li>• <u>Marché potentiel du démantèlement en Europe et en France (éolien terrestre)</u> – Selon la Task Force for Dismantling and Decommissioning lancée à l'initiative de WindEurope en juillet 2020, il y a en Europe près de 34 000 éoliennes terrestres âgées de ≥ 15 ans (~ 36 GW), 25 % des machines (9 GW) ont 20 à 24 ans et 1 GW correspond à des éoliennes âgées de ≥ 25 ans (grand marché pour le démantèlement des parcs éoliens terrestres). En France, à partir de 2025, on prévoit le démantèlement de 1 GW d'éoliennes terrestres par an — 300 à 600 machines/an selon les estimations (=&gt; marchés à capter).</li> <li>• <u>Compréhension de l'environnement du secteur éolien dans ses différentes dimensions — technique/technologique, industrielle, économique et financière, commerciale, réglementaire, politique, environnementale et sanitaire, etc. (intelligence économique/stratégique)</u> – Opportunité stratégique d'adhérer à l'association WindEurope — qui conditionne le partage d'informations à une adhésion — pour les membres de ReCoRD et les acteurs et parties prenantes de la chaîne de valeur de la fin de vie des éoliennes et/ou de l'éolien terrestre/marin plus globalement (participation au séminaire annuel EoLIS — End-of-Life Issues and Strategies, accès à des informations premium, contacts opérationnels, conseil, etc.).</li> <li>• <u>Législation et réglementation relatives à la fin de vie des éoliennes (évolution vers un cadre législatif et réglementaire structurant pour le démantèlement et le recyclage des éoliennes hors d'usage)</u> – La politique de l'Union européenne en matière de déchets est de haut niveau et les exigences réglementaires spécifiques à l'éolien sont fixées aux niveaux national, régional, voire local (démantèlement</li> </ul> | <p><b>Menaces (T)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Marchés du réemploi et de la réutilisation (machines d'occasion, pièces détachées, nouveaux usages)</u> – Forte concurrence en Europe de la part de pays en avance sur la fin de vie des éoliennes (Allemagne, Danemark, Pays-Bas, Espagne, Royaume-Uni...), déjà bien établis sur ces marchés (force l'extension de la durée de vie et/ou le recyclage et la valorisation) — les pays contactés/sollicités sur différents sujets sont globalement peu enclins à partager des informations ou renvoient vers des documents disponibles publiquement (Allemagne, Danemark, Espagne, Italie, Royaume-Uni et Pays-Bas mais aussi Autriche, Belgique, Finlande ou encore Suède).</li> <li>• <u>Filières de démantèlement et de recyclage (concurrence étrangère)</u> – Forte concurrence en Europe avec les filières de démantèlement et de recyclage des éoliennes hors d'usage constituées dans des pays actifs pour l'éolien terrestre (Pays-Bas, Danemark, Allemagne, Espagne) mais aussi pour l'éolien offshore posé (Allemagne, Belgique, Danemark, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni) qui présente certaines spécificités (moins marquées pour l'éolien flottant naissant, les opérations de démantèlement se faisant à terre — logistique maritime et portuaire, sécurité, conception des navires, infrastructures offshores et portuaires, travaux en mer, recyclage).</li> <li>• <u>Législation et réglementation relatives à la fin de vie des éoliennes (évolution vers un cadre législatif et réglementaire structurant pour le démantèlement et le recyclage des éoliennes hors d'usage)</u> – Mais si en France (Code de l'environnement, loi Agec) comme en Europe (directive-cadre européenne 2008/98/CE relative aux déchets), la gestion de la plupart des déchets fait l'objet d'une législation et d'une réglementation précise (déchets de béton, de métaux, de câbles électriques, d'huiles usagées), il n'existe que peu d'exigences réglementaires pour les déchets de composites en France comme en Europe (classification variable des déchets de composites entraînant une diversification des flux de déchets au détriment d'un flux unique), de même qu'il n'existe pas de législation européenne ou nationale spécifique relative aux terres rares.</li> <li>• <u>Viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes (incertitudes sur l'impact économique de la fin de vie des pales)</u> – En 2023, au regard des volumes traités, de la valeur créée et des variations des cours des matériaux/matières, la rentabilité opérationnelle de l'activité de recyclage des éoliennes en fin de vie</li> </ul> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>des machines et fondations, gestion des déchets, remise en état des sites). Pour pallier l'absence de norme industrielle internationale régissant la mise hors service et le démantèlement des éoliennes terrestres et contribuer à l'élaboration d'une telle norme, WindEurope (Task Force for Dismantling and Decommissioning lancée dans le but d'harmoniser les normes nationales qui s'appliquent à la mise hors service et au démantèlement des éoliennes) a présenté en 2020 un document d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres et soumis ce guide à l'International Electrotechnical Commission (IEC — Technical Committee TC 88 for wind energy generation systems) en vue de contribuer à l'amendement de la spécification technique 61400-28 CD relative à la fin de vie des éoliennes. En France, prescriptions techniques applicables aux activités de démantèlement des éoliennes en fin de vie sont régies par l'arrêté (modifié) du 26 août 2011 et les opérations de démantèlement et de remise en état sont prévues à l'article R515-106 du Code de l'environnement. Mais, voir ci-contre (composites et terres rares).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Technologies et procédés de recyclage et valorisation des pales (développements en cours)</u> – D'autres solutions/procédés appliqués seuls ou en combinaison (pyrolyse conventionnelle/rapide/flash, pyrolyse assistée par microondes, pyrolyse par plasma, vapopyrolyse, solvolyse, vaposolvolyse, solvolyse hautes ou basses température et pression, gazéification par lit fluidisé, fragmentation par impulsions électriques à haute tension) sont en développement mais ces méthodes alternatives présentent différents niveaux de maturité technologique TRL (Technology Readiness Level), varient dans leurs effets sur la qualité des fibres (verre ou carbone) en sortie de procédé (longueur, résistance, propriétés mécaniques, etc. — ce qui influence ou détermine la manière dont les recyclats peuvent être réutilisés) et ne sont pas toutes disponibles à l'échelle industrielle. L'orientation vers une technologie de recyclage donnée dépend de la nature des différents constituants du matériau (matrice, renforts) ou de l'application visée pour l'utilisation du recyclat (par ex. de pyrolyse pour les composites à base de fibres de carbone, broyage ou coprocessing pour les composites à base de fibres de verre).</li> </ul> | <p>est faible, voire négative — écart entre i] le coût des opérations de démantèlement (coûts du chantier de démantèlement par ex. équipements, main d'œuvre, prétraitement sur site, coûts d'élimination des divers matériaux par ex. composites, bétons) et de recyclage et ii] le produit que peut en retirer le recycleur (montant facturé à l'exploitant du parc, vente de machines entières, vente de pièces détachées, vente des métaux ferreux et non ferreux, vente des granulats béton, vente des divers matériaux par exemple fibres de verre ou de carbone, terres rares, CSR). Exemples : i] pales : les matériaux composites issus des pales des éoliennes en fin de vie seront majoritairement à base de fibres de verre jusqu'en 2035-2040, les renforts à base de fibres de carbone n'ayant été utilisés qu'à partir de 2015 (moins de valeur) ; ii] aimants : moins de 1 % de tous les aimants permanents usagés sont recyclés actuellement.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Technologies et procédés de recyclage et valorisation des pales (projets concurrents)</u> – Projet CETEC (chimiolyse) qui vise une solution applicable aux pales actuellement en service et à d'autres industries utilisatrices de composites thermodurcissables ; projet DecomBlades (pyrolyse, coprocessing en cimenterie, broyage mécanique), solution applicable aux pales actuellement en service.</li> <li>• <u>Matériaux innovants pour les pales (produit concurrent)</u> – Pales RecyclableBlade entièrement recyclables (chimiolyse).</li> <li>• <u>Impacts environnementaux et sanitaires de la filière de fin de vie des éoliennes (incertitudes sur l'impact environnemental et/ou sanitaire de la fin de vie des pales)</u> – En milieu extérieur, peu voire pas de prise en compte des problèmes d'émissions de poussières (broyage, découpe à la scie, découpe à la pince) ou de dégagements de fumées (découpe au chalumeau) lors de la manipulation et du traitement des pales, ni de mesures de protection contre le bruit.</li> <li>• <u>Diversité des composants d'éoliennes en fin de vie (pales, aimants)</u> – La grande diversité de formes (structures) et de compositions (chimies) des pales en matériaux composites et des aimants à base de terres rares est actuellement un frein à un recyclage efficient et massifié de ces composants. L'hétérogénéité des gisements reflète la diversité des constructeurs/fabricants/équipementiers — Enercon (DE), GE Wind Energy (US), Nordex (DE), Siemens Gamesa (DE/SP), Vestas (DK), etc. — entraînant l'absence de standardisation (design/conception) et de traçabilité des composants =&gt; rôle majeur de la réglementation pour (conduire les fabricants de turbines à) améliorer la circularité de la filière en rationalisant/optimisant les opérations (démantèlement, tri/transport/logistique, technologies et procédés de recyclage) et favoriser des convergences interfilières (gisements avec des origines et usages différents — composites, aimants) car aujourd'hui traitement des déchets tout-venant impossible (massification des flux de matières/déchets à recycler).</li> </ul> <p>Le Guide du recyclage et de l'écoconception des composites (<a href="#">Grec</a>) propose de considérer les filières suivantes pour une potentielle massification des gisements : nautisme de plaisance, déchets industriels, éolien, articles de sports et loisirs, poids lourds. Notant que les filières suivantes sont essentiellement constituées de déchets composites à base de fibres de verre : nautisme (surtout matrice polyester), déchets industriels (surtout matrice polyester), éolien (surtout matrice époxy), poids-lourds (surtout matrice polyester).</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Notes sur l'économie circulaire

La présente étude RECORD rapporte de nombreuses initiatives visant à améliorer la circularité de la filière éolienne, notamment s'agissant des pales (à base de matériaux composites) et des aimants permanents (à bases de terres rares), et qui s'inscrivent selon deux axes : d'une part les méthodes et procédés de recyclage et, d'autre part, les matériaux innovants et écoconçus.

### Pales

À propos des défis techniques et une proposition de feuille de route en matière de circularité et de durabilité des pales d'éoliennes, consulter cet [article](#) (2022) de Justine Beauson — voir notamment les sections 4 (Technical challenges) et 5 (Roadmap to circularity and sustainable wind turbines) dudit article :

- section 4 (Technical challenges) :
  - o 4.1. Prevention,
  - o 4.2. Reuse,
  - o 4.3. Repurpose,
  - o 4.4. Recycling (Mechanical recycling, Thermal recycling, Chemical recycling),
  - o 4.5. Recovery ;
- section 5 (Roadmap to circularity and sustainable wind turbines):
  - o 5.1. Introduction to circular economy principles (Narrowing loops, Closing loops),
  - o 5.2. Life cycle engineering,
  - o 5.3. Social acceptance and perception of technology.

L'article conclut en proposant une liste de recommandations, présentées sous la forme de besoins en matière i] de recherche, ii] d'industrie et iii] de politique, qu'il conviendrait de satisfaire pour lever les verrous identifiés en matière de fin de vie des pales d'éoliennes (cf. illustration ci-après).

| Research needs:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Industry needs:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Policy needs:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Methods to assess the damage state and the properties of wind turbine blades at end-of-life to facilitate reuse and repurpose applications;</li><li>• Technology, methods and models to predict the location the time of availability of wind turbine blades;</li><li>• Alternative design solutions for wind turbine blades facilitating the end-of-life processing of blades. These could be based on the development of new materials, new blade structures for disassembly, etc.</li><li>• Methods to design wind turbine blades for recycling (structures and materials) and recycling processes at the same time;</li><li>• Identifications of applications for recycled materials and input for the formulation of standards on the use of recycled wind turbine blade materials for the identified applications;</li><li>• Life cycle assessment of different wind turbine designs and recycling solutions to identify environmentally-preferable alternatives and support decisions concerning environmental sustainability. This information can for example feed into the construction of guidelines on the selection, prioritization and planning of recycling solutions based on economic, social and environmental impacts (see also below "Policy needs").</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Standards on decommissioning: establishing a reference procedure for the dismantling and collection of wind turbine blades at end-of-life to enable standardized treatment of wind turbine blades at end-of-life regardless of their economic value;</li><li>• Guidelines to design wind turbine blades including end-of-life consideration (given the current of future recycling solutions available);</li><li>• Estimation of the second hand market for wind turbines and wind turbine components to refine the estimations of wind turbine blade waste amounts and locations, and translate that knowledge into business models.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Tracing of end-of-life wind turbine blades to facilitate the estimations of wind turbine blade waste amounts and locations, thus feeding into sector-wide and/or nation-wide policy development (e.g. new regulations);</li><li>• Harmonized regulations on composite waste across countries, regions or the world to enable the establishment of recycling solutions functioning across borders (similar landfill tax, similar collection system and treatment/handling procedures, etc.);</li><li>• Standard on the use of recovered materials from end-of-life wind turbine blades in new applications;</li><li>• Guidelines on the selection, the prioritization and planning of recycling solutions based on economic, social and environmental impacts.</li></ul> |

### Aimants

La Commission européenne a [présenté](#) le 16 mars 2023 sa stratégie pour sécuriser les chaînes d'approvisionnement en matières premières critiques et stratégiques CRMA (Critical Raw Materials Act — sur les Critical Raw Materials et la genèse du CRMA, voir cette [page](#) de la Commission) — projet de règlement qui doit encore être débattu et voté par le Parlement européen et le Conseil avant d'entrer en vigueur.

Outre la préconisation d'une plateforme d'achats communs pour 18 métaux stratégiques — i.e. éléments considérés comme cruciaux, notamment les terres rares destinées à la production d'aimants, pour les industries de défense, du numérique, du spatial et de la transition écologique, et pour lesquels la sécurité d'approvisionnement n'est pas garantie —, la Commission fixe comme [objectifs](#) d'ici à 2030 d'extraire 10 % de ses besoins de mines locales (contre 3 % aujourd'hui), de raffiner 40 % de ses métaux et d'incorporer un minimum de 15 % de métaux recyclés dans ses produits (« le recyclage effectué dans l'Union européenne doit permettre de produire au moins 15 % de sa consommation annuelle »).

Dans sa proposition de règlement — cf. Proposition de [règlement](#) du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 et (UE) 2019/1020 — la Commission européenne pose qu'« Une condition préalable à un recyclage

efficace des aimants est que les recycleurs aient accès aux informations nécessaires concernant la quantité, le type et la composition chimique des aimants présents dans un produit, sur leur emplacement et sur le revêtement, les colles et les additifs utilisés, ainsi qu'à des informations sur les moyens de retirer les aimants permanents du produit. En outre, pour que le recyclage des aimants se justifie sur le plan économique, il faudrait augmenter progressivement la teneur en matières recyclées des aimants permanents intégrés aux produits mis sur le marché de l'Union. Si, dans un premier temps, une transparence devrait être assurée quant au contenu recyclé, il conviendra ensuite de fixer une teneur minimale en matières recyclées après une évaluation spécifique du niveau approprié et des incidences prévisibles. »

La Commission développe spécifiquement ces différents points au chapitre 5 (Durabilité), section 1 (Circularité) de la proposition de règlement, dans les articles 27 et 28, respectivement consacrés à la « recyclabilité des aimants permanents » et au « contenu recyclé des aimants permanents ».

## 4 - Annexe

### 4.1 - Note du CEA-Liten à la mission du CGEDD/CGEJET (recyclage des aimants).



## NOTE

|                                          |                                         |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| LIEU-DATE : GRENOBLE, LE 19 MARS 2019    | OBJET : RECYCLAGE DES EOLIENNES         |
| RÉFÉRENCE : CEA/LITEN/DTNM/SA3D/2019-045 | DESTINATAIRES : Benoit LEGAIT, Philippe |
| ÉMETTEUR : Emmanuelle ROUVIERE           | FOLLENFANT et Sylvie ALEXANDRE (DGE)    |

#### 1) La forte évolution de la demande en aimants de TR pour les génératrices d'éoliennes (2020-2030)

Différentes technologies de turbines d'éoliennes sont aujourd'hui déployées. Toutes ne fonctionnent pas avec des aimants permanents. Toutefois, les concepts avec aimants sont jugés plus fiables (limitation des immobilisations pour maintenance) et plus compacts, ce qui constitue un avantage pour les fermes off-shore notamment<sup>1</sup>. La quantité d'aimants par MW installé dépend du type de turbine, et plus particulièrement de la présence de boîtes de vitesse pour assurer la démultiplication entre la rotation des pales et la rotation de la génératrice. Dans les configurations sans boîte (« direct drive »), la quantité d'aimants est d'environ 600 Kg/MW. La part de ces génératrices devrait s'accroître pour passer de 19% (en 2015) à 44 % du parc en 2030. Sur la même période, la puissance installée annuellement doit passer de 63 GW/an à 90 GW/an. Pour les systèmes avec boîte de vitesse, les quantités sont de 160 Kg/MW pour les génératrices à vitesse moyenne et de 80 Kg/MW à haute vitesse.

Les aimants utilisés contiennent environ 30 % en masse de terres rares (Nd, Pr dites terres rares légères) et entre 3-6 % en masse de terres rares lourdes (Dy et Tb). En 2015, la demande globale en aimants pour les éoliennes est estimée à environ 7800 t/an ce qui représente 2800 t/an de terres rares. La demande en aimants pour 2030, uniquement pour accompagner le déploiement de la technologie des génératrices « direct drive », pourrait atteindre 24.000 t/an.

#### 2) Le contexte actuel de dépendance et d'approvisionnement des TR

Les terres rares regroupent 15 éléments de la série des lanthanides auxquels, compte tenu de la proximité de leurs propriétés, on associe couramment l'Yttrium et le Scandium<sup>2</sup>. Les terres rares légères regroupent le Ce, La, Pr, Nd et Sm et les terres rares lourdes les éléments de la série à partir de l'Eu, avec notamment le Dy et Tb (l'Y rentre dans cette catégorie). Les principales applications des terres rares sont la catalyse (La, Ce), les aimants (Nd, Pr, Dy, Sm), les batteries Ni-MH (La, Ce), la métallurgie (Sc, Nd), le polissage (Ce), l'éclairage (Tb), l'industrie du verre et des céramiques (Y). L'électrolyse haute température met en œuvre des électrolytes solides de type zircone stabilisée à l'Yttrium ou au Scandium dont la demande peut amener à croître avec le déploiement de la filière H<sub>2</sub>.

Les terres rares sont très majoritairement extraites et séparées sous forme d'oxydes en Chine et leur exportation est soumise à des quotas. La crise des terres rares de 2010-11, avec une envolée des prix multipliés par 10, a démontré la forte dépendance à la production chinoise. La demande en TR de plusieurs secteurs a toutefois diminué au cours de la dernière décennie (batteries, éclairage, polissage), mais les terres rares restent des matériaux particulièrement critiques dans le secteur des aimants permanents<sup>3</sup>. Or, la demande dans ce secteur est en forte croissance (>20 % par an) pour pouvoir accompagner le déploiement des véhicules électriques, des éoliennes et plus généralement la croissance globale de la demande en équipements industriels et électriques. C'est donc dans ce secteur des aimants permanents, que l'approvisionnement des terres rares va

<sup>1</sup> C.C. Pavel et al., Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, Resources Policy 52 (2017)

<sup>2</sup> Report on critical materials for the EU 2014 - [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_fr](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_fr)

<sup>3</sup> J. Seaman, Rare earths and China: a review of changing criticality in the new economy, notes de l'IFRI, 01/2019

**liten**

Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

17 avenue des Martyrs | F-38054 Grenoble Cedex

T. +33 (0)4 38 78 33 75 | F. +33 (0)4 38 78 51 17

Anne.pouchot@cea.fr [www-liten.cea.fr](http://www-liten.cea.fr)

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

constituer un des enjeux les plus importants du fait, d'une part, de l'absence de solution alternative à très court terme et, d'autre part, de la très forte demande. **Plusieurs études prospectives mettent l'accent sur le risque élevé de pénurie du (Nd, Pr) dans les prochaines années** dans les différents scénarios de croissance<sup>4</sup>.

L'ouverture (ou la réouverture) de mines hors de la Chine a été envisagée notamment aux USA et en Australie. En Europe, plusieurs études sont en cours en Suède et au Groenland.

**Le recyclage des TR** fait l'objet de nombreux travaux de recherche qui ont montré le potentiel de différentes approches et **ont permis de préciser différentes problématiques**<sup>5</sup> : (i) la collecte et le tri des déchets, la récupération dans le cas des aimants, la gestion des flux et des compositions variables avec souvent de faibles teneurs en TR et (ii) l'impact environnemental des procédés d'extraction des TR. **Le recyclage d'aimants** en fin de vie pourrait permettre, selon les scénarios pris en compte, de fournir au mieux 10 % de la demande et **restera donc insuffisant**<sup>6</sup>.

**La réduction et la substitution** des terres rares dans les aimants doivent compléter la stratégie pour réduire la dépendance aux TR « primaires ». Cette approche est d'ailleurs celle actuellement mise en place par les constructeurs (et équipementiers) automobiles, dont Toyota notamment qui a annoncé la substitution complète pour 2025 du Nd dans les aimants des moteurs par le Ce plus abondant<sup>7</sup>.

**Les problématiques soulevées par la substitution et la réduction des TR** sont principalement **la baisse des performances** des aimants et **le coût des procédés de fabrication** qui impliquent une re-conception des machines électriques.

### 3) Quels sont les verrous technologiques pour réduire la dépendance aux TR ?

**Les verrous du recyclage** dépendent de la voie mise en œuvre. On peut distinguer (i) la voie d'extraction chimique des TR pour les réintroduire en amont de la fabrication des alliages, (ii) la fusion des métaux avec un réajustement des compositions pour produire directement des alliages et (iii) la pulvérisation des métaux sous forme de poudre valorisable dans les procédés de mise en forme par injection ou frittage, voire par fabrication additive. Pour le premier volet (i), **les verrous résident essentiellement dans les faibles teneurs de TR présentes dans les déchets**, les difficultés de séparation des terres rares entre elles, et les évolutions de déchets dont les flux peuvent survenir de 10 à 15 ans après la mise sur le marché. Les voies courtes de remise en fusion ou en poudre s'appliquent nécessairement sur des déchets spécifiques et homogènes. Des volumes importants sont identifiés pour le cas des aimants de type Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B. Les verrous sont liés **aux difficultés de récupération des aimants dans des systèmes** (disques durs, moteurs), sur les contaminations par les résines (pollution par le C) ou les revêtements présents sur les aimants (Ni, Cu, Zn) et l'oxydation pour les poudres fines. L'obtention de poudre dites anisotropes et coercitives nécessaires à la production d'aimants de haute performance présente des difficultés.

**L'économie de matière** par réduction des TR dans les composants dépend fortement de l'application. Pour les aimants, les techniques de localisation des terres rares lourdes visent à implanter le matériau critique (Dy, Tb) uniquement dans les zones du matériau (périphérie des grains) où leur effet est le plus important. Le remplacement d'une fraction du Nd par du Ce jusqu'à 6% est également possible mais nécessite de reconcevoir les moteurs pour compenser le manque de rémanence. **Les verrous de cette approche résident dans la nécessité de mieux contrôler les microstructures** au cours du procédé de métallurgie des poudres pour maintenir les performances. La réduction des pertes lors de la fabrication constitue un levier important d'économie de matière. **On estime par exemple qu'environ 20-30 % de la matière première est perdue dans les usines lors de la découpe des aimants.** Cette matière est en partie recyclée mais les poudres fines, sensibles à l'oxydation, posent des difficultés. **Les procédés de fabrication dits « netshape »** qui peuvent limiter ces pertes pour les aimants ayant les formes les plus complexes présentent encore des problèmes de contamination lors du procédé.

**Enfin, la substitution des TR** par d'autres éléments présente des degrés de maturité et des verrous variables selon les cas et qui ne peuvent être abordés de façon exhaustive dans ce document. Dans le domaine des aimants, de nouvelles phases

<sup>4</sup> S. Deetman, Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation, Technologies, Cars, and Electronic Appliances, Environ. Sci. Technol. 2018, 52, 4950–4959

<sup>5</sup> K. Binnemans, Recycling of rare earths: a critical review, Journal of Cleaner Production 51 (2013)

<sup>6</sup> R. Schulze, Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material, Resources, Conservation and Recycling 113 (2016)

<sup>7</sup> S. Hope, Toyota's long term-vision on electrified vehicles, DEMETER Symposium, 02/2019

ferromagnétiques dures sans TR sont régulièrement identifiés par des techniques de criblage haut débit (par exemple les ternaires Fe-Sb-Hf), mais l'obtention de coercivités élevées est un verrou majeur qui nécessitera des efforts importants de recherche. **Les phases pauvres en TR, comme les phases de type (1 :12) semblent plus prometteuses dans le moyen terme, avec des difficultés à surmonter pour les stabiliser à haute température.**

#### 4) Quels seraient les axes de recherche à privilégier ?

Dans le domaine du recyclage des TR, **l'éco-conception des produits** est un sujet de recherche clef qui est particulièrement pertinent dans la phase actuelle de croissance rapide des applications, notamment pour les aimants. Les travaux de recherche doivent prendre en compte **la globalité des processus de valorisation** des déchets depuis la collecte et le tri, **le démantèlement ou la robotisation et l'intelligence artificielle peuvent jouer un rôle majeur** dans la montée en cadence avec une diversification des déchets, jusqu'au reconditionnement de la matière valorisable (TR, alliages ou poudres).

Pour la voie d'extraction chimique, les sujets concernent l'amélioration des procédés/techniques de séparation et de concentration des éléments. **La sélectivité lors de l'étape de lixiviation (ou dissolution) pourrait être renforcée** par des prétraitements spécifiques et par la mise en œuvre de nouvelles espèces issues de la recherche en chimie des solutions. L'utilisation d'un agent de lixiviation liquide ionique entièrement réutilisable en substitution des acides minéraux permet d'éviter les risques hydrogène et les pollutions associées aux acides minéraux.

Pour les voies de revalorisation courtes des aimants en fin de vie (remise en fusion et pulvérisation), les sujets de recherche visent à mettre au point des procédés permettant de traiter des aimants de composition variables. Pour la voie poudre, cela concerne **la mise au point du procédé de traitement des aimants par hydrogène pour l'obtention de poudres anisotropes (HDDR)** destinées à une valorisation sous forme de plasto-aimants. Pour la voie fusion, il s'agit de définir les conditions de **réajustement des compositions des alliages en fonction des flux entrants** (teneur en TR, nature des revêtements).

Le sujet de la réduction des terres rares dans les aimants doit être abordé **en vue de lever les verrous liés au passage à l'échelle et la mise au point des procédés**. Les conditions de synthèse des alliages ternaires (2 :14 :1) Nd/Ce doivent être optimisées afin de limiter la formation des composés ferromagnétiques doux à base de Fe. Au-delà de la phase magnétique, le procédé conventionnel de métallurgie des poudres doit être ajusté pour piloter la coercivité via une microstructure fine (petits grains isolés magnétiquement) et homogène (localisation du Dy). **Le développement des procédés « netshape » pour l'économie de matière** lors de la fabrication des aimants nécessite de développer de **nouveaux mélanges de polymères** limitant le C résiduel dans le cas du moulage par injection et des **équipements d'impression 3D adaptés** aux poudres de TR (limitation de l'oxydation des TR). Enfin, la substitution des TR dans les aimants par des phases sans TR (nanostructuration), ou pauvres en TR, nécessite une fois la phase sélectionnée (phase 1 :12 par exemple) de mettre au point les cycles de frittage compatibles avec la stabilité des phases magnétiques et de développer des microstructures coercitives.

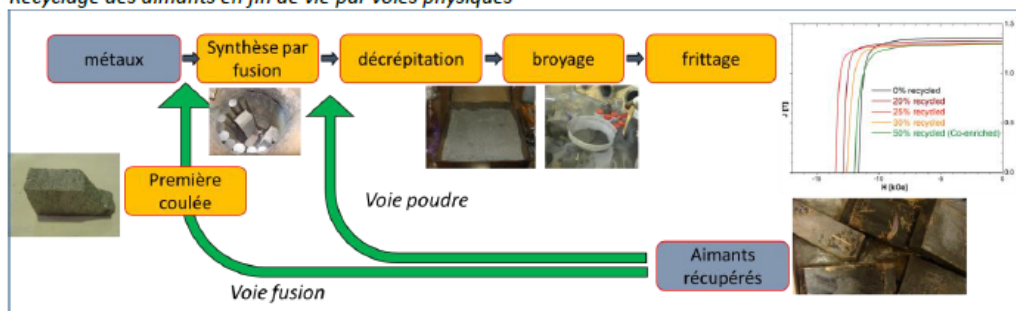
Ces voies d'études sont actuellement portées par le CEA Grenoble dans le cadre de programmes institutionnels (H2020, ANR, KIC) récapitulés ci-dessous.

| Approche                                               | Technologie                                                                                                              | Projet en cours                                |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| L'économie de matière                                  | Mise en œuvre de procédés de fabrication sans usinage (fabrication additive)                                             | Partenariat industriel confidentiel            |
| La réduction des TR                                    | Procédé de mélange de poudres métalliques et de frittage favorisant la diffusion du Dy pour la production d'aimant épais | PMLT CEA<br>Projet KIC RM UPGRADE              |
| L'étude de nouvelles compositions (substitution de TR) | Mise en œuvre de la ligne pilote de fabrication d'aimant                                                                 | H2020 NOVAMAG                                  |
| Le recyclage des aimants                               | Voie chimique et physique                                                                                                | Projets ANR RECVAl et RAP<br>KIC RM PERMAFROST |

#### 5) Le contexte actuel national et européen du recyclage des aimants

Les principaux fabricants d'aimants en Europe participent aux différents projets européens consacrés au recyclage des aimants (Vacuumschmelze, Kolektor et Arelec notamment). Toutefois, la production industrielle en Europe représente moins de 1% de la production mondiale. Ce constat montre qu'il pourrait être intéressant de développer des filières de recyclage dites « courtes » consistant à conserver la phase magnétique à l'issue de la récupération des aimants en vue d'une réutilisation par les acteurs actuels, voire de nouveaux acteurs (diversification).

#### Recyclage des aimants en fin de vie par voies physiques



Les plus gros utilisateurs d'aimants de TR (aujourd'hui l'automobile) se fournissent actuellement en Chine. Il n'y a pas de limitation tant que la Chine sera en capacité de soutenir une croissance de la production pour son propre marché et pour l'exportation. Tous les acteurs industriels ont toutefois clairement identifié le risque de pénurie dans la prochaine décennie, avec une menace forte pour la transition vers des véhicules électriques. Ils expriment le besoin de mettre en place d'une filière de fabrication hors de Chine d'aimants avec moins de TR, d'une part (stratégie de substitution), et de recyclage, d'autre part. Les acteurs pressentis pour la collecte et le démantèlement sont SUEZ et VEOLIA en France. Le CEA a la capacité de réaliser la démonstration de la re-fabrication des aimants ainsi que le passage à l'échelle et le transfert des technologies.

**Notre recommandation serait donc de développer une ou des filières Française et Européenne d'élaboration et de recyclage d'aimants permettant de sécuriser les approvisionnements pour le domaine de l'éolien et autres en s'appuyant éventuellement sur des ressources minières hors de Chine.**

#### Brevets CEA actifs

| N° prioritaire | titre                                                                                                                 | Inventeurs                                                       |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1350199        | Procédé de fabrication d'aimants permanents par chauffage de la poudre ferromagnétique                                | TALLON HUBERT, SERVANT FLORENCE, REVIRAND PASCAL-N               |
| 1356706        | Aimant fritté annulaire à aimantation radiale, présentant une tenue mécanique renforcée                               | DELETTE GERARD, SERVANT FLORENCE, LARGILLER GREGORY, LUCA SORANA |
| 1462819        | Aimant permanent fritté                                                                                               | VIAL FERNAND, RADO CYRIL, SERVANT FLORENCE                       |
| 1461747        | Matériau composite thermiquement conducteur et procédé d'élaboration d'un matériau composite thermiquement conducteur | BANCILLON JACKY, PIETRI THOMAS, OBRINGER LIONEL                  |
| 1561376        | Aimant permanent fritté                                                                                               | VIAL FERNAND, SERVANT FLORENCE, RADO CYRIL, TOSONI OLIVIER       |

Le CEA et en particulier notre équipe est en mesure d'accompagner la mise en place de ces filières industrielles.

### 4.3 - Pool d'experts

Voir le fichier Excel « experts\_EoL\_WT.xlsx », joint au présent rapport d'étude (base de données complète).

Le tableau ci-après, extrait du fichier Excel cité ci-avant, présente les principaux experts sollicités (contact par e-mail/téléphone) dont les retours et avis ont été intégrés dans le présent rapport d'étude.

| Organisation ou établissement                                                                                                   | Géographie        | Identité                              | Fonction                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AD3R (Association pour le développement de la filière démantèlement, recyclage, reconditionnement, revente en région Grand Est) | France            | Benoît Comfaits                       | Président                                                                                                                                                    |
| AD3R (Association pour le développement de la filière démantèlement, recyclage, reconditionnement, revente en région Grand Est) | France            | Delphine Garnier                      | Responsable ingénierie                                                                                                                                       |
| Ademe                                                                                                                           | France            | Vincent Guénard                       | Coordinateur pôle Éolien et Énergies Marines, Service Électricité renouvelable et Réseaux                                                                    |
| Ademe                                                                                                                           | France            | Paul Franc                            | Ingénieur pôle Éolien et Énergies Marines, Service Électricité renouvelable et Réseaux                                                                       |
| Alpha Recyclage Composites                                                                                                      | France            | Laura Pech                            | Directrice générale                                                                                                                                          |
| Arkolia Energies                                                                                                                | France            | Jean-Sébastien Bessière, Katia Sigaud | Resp. président et directrice générale                                                                                                                       |
| BayWa r.e.                                                                                                                      | France            | Tom Lafon                             | Directeur expertise technique                                                                                                                                |
| Boralex                                                                                                                         | France            | Damien Bouilly                        | Responsable développement Auvergne-Rhône-Alpes et Bourgogne-Franche-Comté                                                                                    |
| Boralex                                                                                                                         | France            | Frédéric Gosselin                     | Responsable régional développement ÉnR (éolien et solaire)                                                                                                   |
| Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)                                                                                            | Allemagne         | Wolfram Axthelm                       | Directeur général                                                                                                                                            |
| Business in Wind                                                                                                                | Pays-Bas          | Wim Robbertsen                        | Directeur général                                                                                                                                            |
| Canoe (Composites en Aquitaine, Nanostructures OrganiquEs)                                                                      | France            | Christophe Magro                      | Directeur adjoint et responsable projets coopératifs de la plateforme Canoe                                                                                  |
| Carbon Rivers                                                                                                                   | États-Unis        | Bowie Benson                          | Directeur général                                                                                                                                            |
| Carester                                                                                                                        | France            | Frédéric Carencotte                   | Directeur général                                                                                                                                            |
| Conenor                                                                                                                         | Finlande          | Markku Vilkki                         | Directeur général                                                                                                                                            |
| Connected Wind Services                                                                                                         | Danemark, France  | Emmanuel Schuddinck                   | Directeur général Connected Wind Services France                                                                                                             |
| Continuum                                                                                                                       | Danemark          | Martin Dronfield                      | Directeur général                                                                                                                                            |
| Deutsche Windtechnik                                                                                                            | Allemagne, France | Matthias Brandt                       | Directeur général                                                                                                                                            |
| EDF Renouvelables                                                                                                               | France            | Delphine Bassou                       | Directrice de projets                                                                                                                                        |
| Elys                                                                                                                            | France            | Vincent Brare                         | Directeur général                                                                                                                                            |
| Elys                                                                                                                            | France            | Thierry Ternois                       | Directeur service construction                                                                                                                               |
| Engie Green                                                                                                                     | France            | William Arkwright                     | Directeur général                                                                                                                                            |
| Eole Constructing                                                                                                               | France            | Louis Flaux                           | Président-directeur général                                                                                                                                  |
| ERG France                                                                                                                      | France            | Nicolas Smadja, Gaëlle Mace           | Resp. directeur des affaires juridiques, directeur général au 15/09/2022, et responsable marketing et communication ERG France                               |
| Escofi                                                                                                                          | France            | Jean-Édouard Delaby                   | Président-directeur général                                                                                                                                  |
| Extractive                                                                                                                      | France            | Frédéric Goettmann                    | Président-directeur général                                                                                                                                  |
| Fairmat                                                                                                                         | France            | Benjamin Saada                        | Président-directeur général                                                                                                                                  |
| France Énergie Éolienne (FEE) — France Renouvelables                                                                            | France            | Michel Gioria, Matthieu Monnier       | Resp. délégué général et délégué général adjoint                                                                                                             |
| G2WIND                                                                                                                          | Espagne           | Artur Redondo Angulo                  | Sales Director                                                                                                                                               |
| GEG ENeR (filiale énergies nouvelles et renouvelables de Gaz Électricité de Grenoble — groupe GEG)                              | France            | Nicolas Fléchon                       | Directeur général                                                                                                                                            |
| Gen2Carbon                                                                                                                      | Royaume-Uni       | Mark Hitchmough                       | Directeur général                                                                                                                                            |
| Green-Ener-Tech                                                                                                                 | Danemark          | Carsten Sørensen                      | Directeur général                                                                                                                                            |
| IFP Énergies nouvelles   GreenWITS                                                                                              | France            | Daniel Averbuch                       | Ingénieur responsable du programme Éolien offshore et Énergies marines (Ifpen), directeur général (GreenWITS)                                                |
| Insa Lyon, Antea Group                                                                                                          | France            | Laurent Briançon, Éric Antoinet       | Resp. maître de conférence Insa Lyon, directeur scientifique du projet FEDRE, et directeur technique infrastructures, Antea Group, directeur du projet FEDRE |
| Journal de l'éolien                                                                                                             | France, Allemagne | Vincent Boulanger                     | Rédacteur en chef Observ'ER (Observatoire des Énergies Renouvelables), en particulier Journal de l'éolien                                                    |
| Kallista Energy                                                                                                                 | France            | Johann Tardy, Nishal Ramdoo           | Resp. directeur général et responsable communication                                                                                                         |
| MagREESource                                                                                                                    | France            | Éric Petit, Sophie Rivoirard,         | Resp. président-directeur général et cofondateur, ex-chercheuse à l'Institut Néel (CNRS)                                                                     |

|                                                                      |             |                                        |                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                      |             | Daniel Fruchart                        | Grenoble), cofondatrice et directrice technologie & produit de MagREESource, ex-chercheur à l'Institut Néel et conseiller scientifique de MagREESource                                                        |
| MyWindParts                                                          | France      | Sébastien Duchesne                     | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Neocomp GmbH                                                         | Allemagne   | Tobias Engelhardt                      | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| NEOcyce                                                              | Allemagne   | Carlo Vormweg                          | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Neowa GmbH                                                           | Allemagne   | Mika Lange                             | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Net-Wind                                                             | France      | Didier Évano                           | Président                                                                                                                                                                                                     |
| NREL (National Renewable EnergyLaboratory), Wind Energy Technologies | États-Unis  | Derek Berry                            | Ingénieur principal, directeur de la technologie des éoliennes au sein de l'institut IACMI (Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation, <a href="https://iacmi.org/">https://iacmi.org/</a> ) |
| NREL (National Renewable EnergyLaboratory), Wind Energy Technologies | États-Unis  | Aubryn Cooperman                       | Chercheuse en génie mécanique                                                                                                                                                                                 |
| Ortec                                                                | France      | Émilie Cusumano                        | Directrice affaires générales                                                                                                                                                                                 |
| Procotex SA Corporation NV                                           | Belgique    | Nicolas Douchy                         | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| R4 Composites                                                        | France      | Marie François                         | Directrice de projet                                                                                                                                                                                          |
| ReBlade                                                              | Royaume-Uni | Steven Lindsay                         | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Reciclaia                                                            | Espagne     | David Romero                           | Directeur des opérations                                                                                                                                                                                      |
| REEcycle                                                             | États-Unis  | Casey McNeil                           | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| ReFiber ApS                                                          | Danemark    | Erik Grove-Nielsen                     | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Regen Fiber                                                          | États-Unis  | Jeff Woods                             | Directeur business development                                                                                                                                                                                |
| Renewable Parts                                                      | Royaume-Uni | James Barry                            | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Repowering solutions                                                 | Espagne     | Alfonso Alvaro                         | Business Developer Executive                                                                                                                                                                                  |
| Reprocover                                                           | Belgique    | Charles Göbbels                        | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| RES France (Q Energy France depuis mars 2022)                        | France      | Jean-François Petit, Francisco Varela  | Resp. directeur général et directeur du développement Q Energy France                                                                                                                                         |
| RES France (Q Energy France depuis mars 2022)                        | France      | Laurie Gilbert, Florian D'Angelot      | Resp. responsable repowering et responsable ingénierie éolien                                                                                                                                                 |
| RES France (Q Energy France depuis mars 2022) puis Vensolair         | France      | Christophe Soulier                     | Ex-responsable repowering chez RES France (jusqu'en janvier 2021), directeur construction chez Vensolair                                                                                                      |
| Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)                         | Pays-Bas    | Marcus Polman                          | Responsable climat et énergie                                                                                                                                                                                 |
| Sepale                                                               | France      | Christophe Bret                        | Président-directeur général                                                                                                                                                                                   |
| Ser (Syndicat des énergies renouvelables)                            | France      | Alexandre Roesch                       | Délégué général                                                                                                                                                                                               |
| Ser (Syndicat des énergies renouvelables)                            | France      | Jérémy Simon                           | Délégué général adjoint                                                                                                                                                                                       |
| Ser (Syndicat des énergies renouvelables)                            | France      | Camille Charpiat                       | Responsable éolien terrestre                                                                                                                                                                                  |
| Ser (Syndicat des énergies renouvelables)                            | France      | Anne Georgelin                         | Responsable éolien en mer                                                                                                                                                                                     |
| Spares In Motion                                                     | Pays-Bas    | Jochem Sauer                           | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Suomen Tuulivoimayhdistys                                            | Finlande    | Heidi Paalatie                         | Directrice des operations                                                                                                                                                                                     |
| Svensk Vindenergi                                                    | Suède       | Daniel Badman                          | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Svensk Vindkraft                                                     | Suède       | Mari-Louise Wernersson                 | Directrice des operations                                                                                                                                                                                     |
| Umweltbundesamt (UBA)                                                | Allemagne   | Petra Weißhaupt                        | Produits et production durables, économie circulaire                                                                                                                                                          |
| Université de Leeds                                                  | Royaume-Uni | Anne Velenturf                         | Chercheuse en économie circulaire                                                                                                                                                                             |
| Université technique du Danemark DTU (Danmarks Tekniske Universitet) | Danemark    | Justine Beauson                        | Ingénieure de développement Department of Wind and Energy Systems                                                                                                                                             |
| Valrea (groupe Valorem)                                              | France      | Baptiste Wallyn                        | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Velocita Energies (groupe Envision Energy)                           | France      | Éric Caradec                           | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| Vlaamse Windenergie Associatie (VWEA)                                | Belgique    | Maarten Dedeyne, Onno Mauritz          | Resp. directeur et directeur commercial Business in Wind (voir cette entrée)                                                                                                                                  |
| wind-turbine.com, WindTurbines-MarketPlace.com                       | Allemagne   | Bernd Weidmann                         | Directeur général                                                                                                                                                                                             |
| WindEurope                                                           | Europe      | Alexandre Vandenberghe, Rebekka Taylor | Resp. développement durable et responsable des adhésions                                                                                                                                                      |