Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de la transition écologique et solidaire

CGEDD
CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

N° 012673-01

Ministère de l'économie et des finances

CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ÉCONOMIE
DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES TECHNOLOGIES

N° 2019/N°01/CGE/SG

ECONOMIE CIRCULAIRE DANS LA FILIERE EOLIENNE TERRESTRE EN FRANCE

Rapport à

Monsieur le ministre d'Etat, ministre de la transition écologique et solidaire

Établi par

Sylvie Alexandre
Ingénieure générale des ponts, des eaux et des forêts

Philippe Follenfant
Ingénieur général des mines

Benoît Legait
Ingénieur général des mines

Mai 2019

PUBLIÉ

SOMMAIRE

SYNTHESE **5**

TABLE DES RECOMMANDATIONS **8**

Introduction **9**

1 CADRE REGLEMENTAIRE **11**

1.1 Cadre communautaire de l'installation, du soutien et du démantèlement des éoliennes 11

1.1.1 La directive 2018/2001 du Parlement et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (dite RED II) 11

1.1.2 La directive-cadre 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets, ... 12

1.1.3 Les lignes directrices relatives aux aides d'Etat, à la protection de l'environnement et à l'énergie pour la période 2014/2020 : 13

1.2 Cadre national de l'installation et du démantèlement des éoliennes du code de l'environnement 14

1.2.1 Les dispositions législatives 14

1.2.2 Les articles R 553-1 à 8 du code de l'environnement (décret du 23 août 2011) 15

1.2.3 L'arrêté ministériel du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité éolienne au sein d'une ICPE 15

1.2.4 L'arrêté ministériel du 26 août 2011 relatif à la remise en état et à la constitution des garanties financières pour les installations éoliennes 15

1.3 Qualification, traçabilité, et transport et des déchets de parcs éoliens 16

1.3.1 Qualification et traçabilité des déchets 16

1.3.2 Transport des déchets 16

2 ESTIMATION DES FLUX MATIERES ISSUES DU DEMANTELEMENT DES PARCS EOLIENS **18**

2.1 Les masses de matières issues du démantèlement des parcs éoliens 18

2.2 Les spécificités des différentes technologies d'éoliennes 19

2.3 Les durées de vie des éoliennes et leurs calendriers de démantèlement 21

2.4 La composition des composites des pales des éoliennes 22

2.5 Le contenu en terres rares des aimants permanents 23

3 ENJEUX DE LA FIN DE VIE ET POSITION DES ACTEURS **26**

3.1 Des enjeux à concilier voire à arbitrer, bref état des lieux 26

3.2 Initiatives prises et positions des acteurs 28

4 ECONOMIE GENERALE DES FILIERES DE TRAITEMENT DES EOLIENNES EN FIN DE VIE **30**

4.1 Prévention et réduction de la production des déchets d'éoliennes 30

4.2 Conditions économiques et industrielles de mise en place d'une filière industrielle de recyclage des éoliennes 31

4.3 Valorisation des métaux (hors terres rares) issus des éoliennes 34
4.4 Traitement du béton 34
4.5 Traitement des matériaux composites constitutifs des pales d'éoliennes 35
4.5.1 La valorisation matière 36
4.5.2 La valorisation énergétique 37
4.5.3 La mise en décharge 40
4.6 Les terres rares 40
5 RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT SUR LE RECYCLAGE DES PALES ET DES AIMANTS PERMANENTS DES EOLIENNES 42
5.1 Les pales d'éoliennes 42
5.1.1 Procédés mécaniques : broyage et réincorporation 42
5.1.2 Pyrolyse et thermolyse 43
5.1.3 Solvolyse 44
5.1.4 Courant électrique pulsé 44
5.1.5 Résines plus facilement recyclables 44
5.1.6 Conclusion sur les innovations pour le recyclage des pales d'éoliennes 45
5.2 Les aimants permanents 45
5.2.1 Réutilisation directe d'aimants usagés 46
5.2.2 Régénération de l'alliage 46
5.2.3 Extraction chimique des terres rares (hydrométallurgie) 46
5.2.4 Substitution ou réduction des terres rares dans les aimants permanents 47
5.2.5 Conclusion partielle sur le recyclage des aimants permanents 47
6 CONCLUSION ET PROPOSITIONS DE LA MISSION 48
ANNEXES 54
Annexe 1 : Lettre de mission 55
Annexe 2 : Liste des acronymes utilisés 57
Annexe 3 : Liste des personnes rencontrées ou interrogées 58
Annexe 4 : Cadre national du soutien aux parcs éoliens du code de l'énergie 62
Annexe 5 : Note du CEA Liten transmise à la mission sur le recyclage des aimants permanents ... 64
Annexe 6 : Le recyclage des éoliennes aux Pays-Bas 68
Annexe 7 : Le recyclage des éoliennes au Danemark 78
Annexe 8 : Le recyclage des éoliennes en Allemagne 81

SYNTHESE

Le ministre d'Etat, ministre de la transition écologique et solidaire a demandé au Conseil général de l'environnement et du développement durable et au Conseil général de l'économie de lui faire des propositions permettant l'émergence d'une économie circulaire dans la filière éolienne.

Ces propositions doivent permettre d'identifier les initiatives à prendre en termes de réutilisation de certains équipements et de recyclage des matériaux issus du démantèlement des installations en fin de vie. Elles doivent également contribuer à la création de valeur et au développement d'activités économiques viables dans ce domaine.

En accord avec le cabinet et bien que cela ne fût pas explicitement mentionné dans la lettre de mission, nous avons limité nos travaux au parc éolien terrestre[1].

Le cadre règlementaire de la fin de vie des parcs éoliens se conforme aux directives européennes relatives aux déchets et à la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. Il doit par ailleurs respecter les lignes directrices relatives aux aides d'Etat, à la protection de l'environnement et à l'énergie. La mission a noté, sur ce dernier point, l'impossibilité de réutiliser, en France et dans le reste de l'Union européenne, des pièces d'occasion issues du démantèlement sur un parc nouveau souhaitant bénéficier d'un contrat d'achat avec compensation tarifaire. Cette réutilisation est de facto limitée à de la maintenance sur des parcs existants. La mission a également constaté l'absence de cadre communautaire dédié et obligatoire de durabilité de l'énergie éolienne.

Le cadre règlementaire français précise par ailleurs un certain nombre de conditions techniques et financières s'appliquant au démantèlement des éoliennes. Les plus spécifiques concernent la constitution de garanties financières (fixées à 50 000 euros par éoliennes en 2011, avec une formule d'actualisation) destinées à couvrir les opérations de démantèlement et de remise en état et les conditions d'extraction des fondations en fonction de la nature et de l'usage des terrains. Sur ce point, la mission a constaté qu'une excavation totale est obligatoire dans plusieurs pays européens et facultative en France, mais en pratique systématique en cas de réimplantation de nouvelles éoliennes sur le même site (opération dite de « repowering »).

La mission a également, comme l'y invitait la lettre du ministre, examiné les conditions de contrôle aux frontières d'éventuels transferts de déchets issus d'éoliennes. Ces déchets n'étant pas classés comme dangereux, ces transferts sont soumis à simple notification. Cependant, selon le pôle français de transfert transnational des déchets, aucun mouvement à l'import comme à l'export n'a été constaté.
Enfin, les flux de déchets issus des parcs éoliens sont identifiés, en nature et en quantité, sur un registre propre à chaque installation.

[1] Les éoliennes offshores et leur démantèlement présenteraient des caractéristiques très différentes. Par ailleurs, le parc éolien maritime n'étant pas encore installé en France, les premiers démantèlements n'interviendront qu'après 2040.

La mission s'est efforcée[2] d'estimer sur les vingt prochaines années les flux des différents matériaux constitutifs des parcs éoliens, et donc susceptibles d'en sortir 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.

La durée de vie des éoliennes dépend de l'évolution physique de leurs composants ; mais elle est aussi, et surtout, fonction de la stratégie suivie par les exploitants à l'issue, voire au cours, de la période de validité des tarifs de rachat. L'impact des opérations de repowering au bout de quinze ans, comme cela semble être le cas pour les parcs démantelés récemment, peut en particulier générer des flux de déchets plus importants que prévu dans les années à venir. La mission n'a cependant pas jugé opportun de « brider » de telles stratégies, le repowering étant favorable à l'atteinte de l'objectif national de développement de l'énergie éolienne, tant en puissance qu'en taux de charge, et à la prévention des risques liés aux éoliennes.

L'économie générale et l'industrialisation de filières de traitement des éoliennes en fin de vie doivent être cohérentes à la fois avec les principes environnementaux sous-tendant l'économie circulaire et l'équilibre financier des différents acteurs économiques.

La mission a noté une assez forte dispersion de la quantité de matière utilisée par MW installé selon les différents modèles d'éoliennes. Afin de favoriser l'économie de matières premières lors de la conception et de la fabrication des éoliennes, cela l'a conduit à définir l' « efficacité massique » d'une éolienne comme le rapport entre le poids de sa partie productive « nacelle+rotor » et sa puissance et à recommander l'introduction de ce critère dans la pondération de la note attribuée aux candidats aux appels d'offres.

L'émergence d'une filière industrielle de recyclage des éoliennes dépend de l'existence d'un marché en volume, avéré selon les calculs de la mission (et susceptible de créer de l'ordre de cent à deux cents emplois notamment dans les régions Hauts-de-France, Grand Est et Occitanie), et de la possibilité pour les industriels du recyclage d'y réaliser une marge opérationnelle satisfaisante. Sur ce dernier point, les calculs économiques effectués par la mission montrent que, pour minimiser divers aléas (coût du chantier de démantèlement, variabilité du prix des métaux), il est opportun d'augmenter la valeur du cautionnement au-delà des 50 000 euros (actualisés), selon une formule tenant compte de la masse de l'aérogénérateur.

Le traitement des matériaux composites (résines organiques et fibres de renforcement) constitutifs des pales d'éoliennes pose un défi particulier, aucune des solutions actuellement mises en œuvre n'offrant de garantie satisfaisante à la fois sur les plans technique, écologique et économique.
-La voie actuellement retenue est l'incinération avec valorisation énergétique, principalement dans des cimenteries. Si elle permet aujourd'hui de traiter correctement les flux pour l'instant limités de ces matériaux, la pérennité de cette solution à un coût économiquement supportable n'est pas garantie

[2] A partir de plusieurs sources, dont la plus notable est l'étude Ademe de mai 2015 « Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien »

dans le futur, d'autant plus que d'autres installations aptes à brûler les combustibles de récupération (CSR), auxquels peuvent être assimilés les déchets composites, tardent à se mettre en place.
-La voie de la valorisation matière, privilégiée dans les principes de l'économie circulaire, ne semble offrir de perspective économique que pour la récupération de la fibre de carbone, dont l'usage est encore limité (mais destiné à croître) dans les pales d'éoliennes.
-Une autre voie, plus prometteuse à terme, consisterait à remplacer dans la fabrication des pales d'éoliennes les résines thermodurcissables actuelles par une résine thermoplastique, plus facilement recyclable ; en particulier, la société française Arkema promeut une telle résine. Il reste à obtenir la certification nécessaire pour ce matériau, et surtout à démontrer la possibilité de fabriquer des éoliennes fiables en validant un prototype.

La question des terres rares, rentrant dans la fabrication d'aimants permanents utilisés dans certains types d'éoliennes, a pu paraître préoccupante, la production de tels aimants se concentrant au Japon et en Chine et cette dernière fournissant par ailleurs l'essentiel des terres rares. En France, seuls 3% du parc éolien terrestre installé comportent des aimants permanents (dont les futures éoliennes en mer seront par contre largement équipées) ; les fabricants d'éoliennes cherchent à s'affranchir de cette éventuelle dépendance en développant des génératrices synchrones sans aimants à terres rares. A terme, la réutilisation directe, après reconfiguration et régénération de l'alliage, semble la voie de recyclage la plus pertinente économiquement, à condition d'envisager les volumes collectés au niveau européen : l'installation de recyclage se situerait alors probablement en Allemagne, lieu d'implantation du seul fabricant européen d'aimants permanents.

C'est sur la base de ces analyses que la mission formule l'ensemble des recommandations ci-après :

* *

TABLE DES RECOMMANDATIONS

Avertissement : l'ordre dans lequel sont récapitulées ci-dessous les recommandations du rapport ne correspond pas à une hiérarchisation de leur importance mais simplement à leur ordre d'apparition au fil des constats et analyses du rapport.

Recommandation n° 1. Ajouter à la part fixe actuelle de la garantie financière de 50K€/éolienne une part variable proportionnelle notamment à la masse de l'éolienne (éoliennes nouvelles et actuelles, fixation par arrêté). 48

Recommandation n° 2. Introduire une obligation de responsabilité élargie du producteur (REP) pour les pales sur le modèle de la REP véhicules hors d'usage (REP-VHU), dans un premier temps sans éco-organisme ni éco-contributions associés pour les éoliennes actuelles et futures (texte législatif). 49

Recommandation n° 3. Imposer deux nouveaux critères objectifs d'économie circulaire (efficacité massique et bonus de recyclabilité) et une obligation d'ACV dans les appels d'offres lancés par la CRE pour les installations futures soumises à autorisation. 50

Recommandation n° 4. Faire tenir par exemple par le CGDD 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..... 51

Recommandation n° 5. Réaliser une cartographie (SIG) des parcs et des zonages applicables pouvant empêcher ou limiter le « repowering » dans ces parcs (servitudes aéronautiques, liées à la défense, électroniques et autres, zones Natura 2000, etc…). 51

Recommandation n° 6. Engager une concertation avec les exploitants en vue de modifier les exigences de remise en état en imposant l'excavation complète des massifs d'ancrage (éoliennes nouvelles et actuelles). 52

Recommandation n° 7. Pour susciter des acteurs industriels français du recyclage des composites et des terres rares, cibler le financement public (ANR, ADEME, PIA…) pour permettre l'émergence de procédés viables sur le plan économique notamment (1) pour les composites en fibres de verre, les voies mécaniques (2) pour les aimants permanents, la régénération. Pour les composites et les aimants permanents du futur, travailler sur (1) les résines thermoplastiques pour pales (2) la substitution ou la réduction de la teneur de terres rares dans les aimants..... 52

INTRODUCTION

Par lettre du 14 janvier 2019, le ministre d'Etat, ministre de la Transition écologique et solidaire a sollicité le Conseil général de l'économie et le Conseil général de l'environnement et du développement durable pour une mission dont l'objectif est d'identifier les initiatives à prendre afin de faire émerger un modèle d'économie circulaire dans la filière éolienne, et de faire des propositions d'actions à conduire dans le court et moyen terme pour créer les conditions d'émergence de ces nouvelles activités économiques, sans apport structurel de financement public (cf. lettre de mission en annexe 1). A la demande du cabinet du ministre, la mission a centré ses travaux sur le seul **éolien terrestre**, dont commencent les premières opérations de démantèlement, souvent suivies de renouvellement avec augmentation de puissance[3]. En effet, le parc maritime reste à installer, avec une seule éolienne expérimentale installée au large du Croisic, ses perspectives de démantèlement sont donc plus lointaines, au-delà de 2040.

Dans ce contexte, la mission a étudié les incitations à l'économie circulaire dans le cadre européen et national s'appliquant aux installations éoliennes de production d'électricité, puis analysé le parc terrestre installé et les principaux flux de matières issus du démantèlement, en les mettant en perspective avec ceux traités par les filières nationales de collecte, tri et recyclage pour ces mêmes matières. Le rapport présente les perspectives technologiques pour les pales en composites et les aimants permanents, actuellement non recyclables, et analyse les principaux freins à la valorisation des déchets de cette filière. Il propose en conséquence plusieurs leviers, réglementaires et normatifs, pour favoriser l'économie circulaire de la filière éolienne, pour le stock des parcs déjà installés et pour les futures éoliennes.

La filière éolienne terrestre est en expansion en France, qui se classe, à fin 2017, quatrième état membre de l'Union européenne pour la puissance installée[4]. D'une puissance totale inférieure à 1MW jusqu'en 2005, le parc a atteint 15,1 GW au 31 décembre 2018, et la production éolienne a atteint 27,8 TWh en 2018, portant le taux de couverture par l'énergie éolienne de la consommation moyenne d'électricité à 5,8%, contre 5% en 2017[5]. Cette montée en puissance s'accompagne d'un développement des métiers de l'éolien en France[6] qui représentent, à fin 2017, 17100 emplois[7]. Le parc raccordé comprend à fin 2018 environ 8000 éoliennes[8], de puissance unitaire variant de 0,3 à 3,6 MW. L'accroissement de puissance résulte du développement de nouveaux parcs et de l'évolution technologique rapide des machines, de plus en plus grandes et puissantes. La nouvelle programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit d'atteindre pour l'éolien terrestre 24,6 GW en 2023 et entre 34,1 et 35,6 GW en 2028. Du fait de cet essor récent, la filière éolienne, en France et en Europe, aborde tout juste la réflexion sur les voies et moyens d'optimiser son impact environnemental, via la maîtrise de ses ressources, et de mettre en place une véritable économie circulaire, permettant de réduire sa consommation de matières premières vierges, de maîtriser ses flux de déchets et d'optimiser leur fin

[3] Cette opération, en général dans le but d'augmenter l'énergie produite, est appelée *Repowering*

[4] Après l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume Uni; source Observatoire de l'éolien 2018 France Energie Eolienne

[5] Source : Bilan électrique 2018 de RTE février 2019

[6] Etudes et développement de projets, fabricants de composants, ingénierie et construction, exploitation et maintenance

[7] Source Observatoire France Energie Eolienne

[8] Source Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019

de vie. Le projet de PPE a prévu trois mesures d'accompagnement : « préparer le recyclage à grande échelle des installations en fin de vie pour les filières pour lesquelles ce n'est pas déjà fait », « rendre obligatoire d'ici 2023 le recyclage des matériaux constitutifs des éoliennes lors de leur démantèlement », et « favoriser la réutilisation des sites éoliens en fin de vie pour y réimplanter des machines plus performantes ».

1 CADRE REGLEMENTAIRE

1.1 Cadre communautaire de l'installation, du soutien et du démantèlement des éoliennes

1.1.1 La directive 2018/2001 du Parlement et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (dite RED II)

La directive débute par plusieurs considérants dont deux relatifs aux ressources :

- ***Considérant 21*** *: « Lorsqu'ils élaborent leurs régimes d'aide en faveur des sources d'énergie renouvelables, les États membres devraient examiner s'il existe une source durable de biomasse et tiennent dûment compte des principes de l'économie circulaire et de la hiérarchie des déchets établie dans la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil (1) afin d'éviter toute distorsion inutile sur les marchés des matières premières. La prévention de la production de déchets et le recyclage des déchets devraient constituer l'option prioritaire. Les États membres devraient éviter de créer des régimes d'aide qui seraient incompatibles avec les objectifs en matière de traitement des déchets et entraîneraient une utilisation inefficace des déchets recyclables. »*
- ***Considérant 25 :*** *« Les États membres devraient éviter les situations qui créent des distorsions et conduisent à l'importation massive de ressources de pays tiers. Il convient à cet égard d'envisager et de promouvoir une approche fondée sur le cycle de vie. »*
- ***Les considérants 44 et 45*** incitent les Etats membres pour ces installations à déployer rapidement les procédures d'autorisation en ce qui concerne la réduction de la pollution industrielle, « compte tenu de leur grande utilité générale en termes de durabilité et d'environnement » (considérant 44), et à tenir compte pour leur évaluation ou leur autorisation, « de l'ensemble du droit de l'Union en matière d'environnement et de la contribution apportée par l'énergie produite dans la réalisation des objectifs en matière d'environnement et de changement climatique » (considérant 45).

Toutefois, pour les énergies renouvelables électriques, rien dans le texte de la Directive n'oblige ni n'incite les Etas membres à appliquer des critères de durabilité sur les ressources et l'économie circulaire dans les procédures d'aides, ni à se référer obligatoirement à des méthodes d'Analyse de Cycle de Vie. Le texte prévoit notamment :

- à l'article 3 « Les États membres veillent à ce que leurs politiques nationales, y compris les obligations découlant des articles 25 à 28 de la présente directive, et leurs régimes d'aide soient définies en tenant dûment compte de la hiérarchie des déchets établie à l'article 4 de la directive 2008/98/CE pour s'efforcer d'éviter des distorsions indues sur les marchés des matières premières Les États membres n'accordent pas d'aide à l'énergie renouvelable produite par incinération de déchets si les obligations de collecte séparée énoncées dans ladite directive ne sont pas satisfaites. »

- à l'article 4 relatif aux régimes d'aides, que ceux-ci doivent être fondés sur le marché, éviter les distorsions inutiles, être conçus de manière à assurer une intégration optimale de l'électricité renouvelable sur le marché, et garantir que « les aides sont accordées de manière ouverte, transparente, concurrentielle, non discriminatoire et efficace au regard des coûts. » Lorsqu'une aide est accordée au moyen d'une procédure de mise en concurrence, les Etats membres doivent « définir

et publier des critères non discriminatoires et transparents pour l'admissibilité des projets aux procédures ». Le texte ne mentionne pas explicitement de critères de durabilité dans les « critères non discriminatoires et transparents » que les Etats membres sont autorisés à publier pour la mise en concurrence, mais prévoit que la Commission publie un rapport tous les 3 ans sur ces régimes, en analysant en particulier leur aptitude à « limiter l'impact environnemental ».

- à l'article 6 sur la stabilité de l'aide financière, que « Les États membres peuvent adapter le niveau de l'aide conformément à des critères objectifs, pour autant que ces critères aient été prévus au niveau de la conception originale du régime d'aide. » L'article prévoit notamment que les Etats membres veillent à ce que la révision du niveau et des conditions de l'aide accordée aux projets « n'ait pas d'incidence négative sur les droits conférés, ni ne compromette la viabilité économique des projets bénéficiant de l'aide. » Les Etas membres doivent prévoir un calendrier à long terme (5 ou 3 années) préfigurant l'allocation des aides, mis à jour annuellement en cas d'évolution des marchés ou de l'allocation des aides. Enfin ils doivent évaluer au moins tous les cinq ans l'efficacité de leurs régimes d'aides et leurs effets distributifs majeurs sur les différentes catégories de consommateurs et sur les investissements.

- enfin à l'article 15 : « Les États membres définissent clairement les spécifications techniques éventuelles à respecter par les équipements et systèmes d'énergie renouvelable pour bénéficier des régimes d'aide. Lorsqu'il existe des normes européennes, comme les labels écologiques, les labels énergétiques et autres systèmes de référence technique mis en place par les organismes de normalisation européens, ces spécifications techniques sont exprimées par référence à ces normes. Ces spécifications techniques n'imposent pas le lieu de certification des équipements et des systèmes et ne constituent pas un obstacle au bon fonctionnement du marché intérieur. »

La directive ne pose donc pas, pour l'énergie électrique renouvelable, dont l'énergie éolienne, de cadre dédié obligatoire de durabilité au plan communautaire, concrétisé par la mise en œuvre d'Analyses de Cycle de Vie (ACV), tel que celui mis en place pour les biocarburants. En outre, elle prévoit que l'instauration d'un tel cadre par les Etats membres est soumise au cas par cas à l'évaluation par la Commission européenne de sa compatibilité avec le droit communautaire et avec les Lignes directrices relatives aux aides d'Etat à la protection de l'environnement et à l'énergie pour la période 2014/2020 (cf. point 1.1.3).

1.1.2 La directive-cadre 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets,

Elle instaure le principe de la hiérarchie des déchets lors d'un démantèlement (article 4), qui détermine l'ordre des priorités dans le domaine de la prévention et de la gestion des déchets : Prévention / préparation pour réutilisation / recyclage / autre valorisation (énergétique notamment) / élimination. Appliqué à l'éolien, ce principe revient, selon la Fédération France Energie Eolienne, à agir dans l'ordre de priorité suivant :

- allonger la durée de vie des éoliennes, actuellement non définie, et optimiser les matériaux des pales, au titre de la prévention,
- prévoir une « seconde vie » des éoliennes, au titre de la réutilisation
- recycler les matériaux par traitement des matières,
- toute autre valorisation (thermique ou énergétique),
- en dernier lieu l'élimination, la mise en décharge étant le recours ultime.

1.1.3 Les lignes directrices relatives aux aides d'Etat, à la protection de l'environnement et à l'énergie pour la période 2014/2020 :

Elles s'appliquent aux aides en faveur de l'énergie d'origine éolienne, intégrée à la définition des sources d'énergie renouvelables décrites au point 1.3 alinéa 5. Les principes d'appréciation de la compatibilité des aides sont rappelés au point 3, en substance de permettre « de contribuer davantage aux objectifs de l'Union européenne en matière d'environnement ou d'énergie sans altérer les conditions des échanges dans une mesure contraire à l'intérêt commun ». Les alinéas 126 et 127 prévoient la mise en œuvre obligatoire de procédures de mises en concurrence fondées sur ces critères clairs, transparents et non discriminatoires à partir du 01/01/2017, pour tous les projets éoliens de capacité supérieure à 6 MW ou 6 unités de production. Pour les projets plus petits, les aides peuvent être octroyées sans mise en concurrence sous forme d'un complément de rémunération au prix de marché.

L'alinéa 50 rappelle qu'est considérée comme non compatible avec le marché intérieur toute aide octroyée à un projet dont la demande d'aide a été adressée aux autorités nationales après le début des travaux liés au projet. L'alinéa 129 précise que l'aide n'est octroyée que jusqu'à l'amortissement complet de l'installation selon les règles comptables ordinaires et toute aide à l'investissement perçue précédemment doit être déduite des aides au fonctionnement, ce qui a conduit à l'imposition de matériel neuf dans la réglementation française (cf. point 1.2.3).

Pour l'éolien, les lignes directrices mettent fin au régime d'obligation d'achat à un tarif fixé mis en œuvre auparavant, et instaurent un régime de complément de prix décliné entre un guichet ouvert pour les petites installations, et appels d'offres pour les plus grandes.

S'agissant des aspects environnementaux, elles ne prévoient pas d'éventuels effets environnementaux occasionnés par les sources d'électricité renouvelable, à l'exception des aides à la production d'hydroélectricité, pouvant produire des effets négatifs sur les systèmes d'alimentation en eau et sur la biodiversité, et en conséquence devant respecter la Directive 2000/60/CE sur l'eau (alinéa 117). Si les Etats membres souhaitent introduire des critères de durabilité dans les régimes d'aide à l'électricité renouvelable, ceux-ci sont assujettis à l'obligation de notification. C'est par exemple, ce qui s'est produit pour les appels d'offre français concernant les centrales solaires au sol d'une puissance comprise entre 500 kWc et 30 MWc. La notification par la France du cahier des charges prévoyant dans sa notation une note de l'évaluation carbone[9] a été déclarée compatible avec le Traité, par décision de la Commission 2018/C 080/01 publiée le 2 mars 2018 au JO de l'Union.

Enfin, s'il est prévu (alinéa 118) que les aides d'Etat en faveur de l'énergie produite à partir de déchets peuvent contribuer positivement à l'environnement, à condition de ne pas se soustraire au principe fondamental de la législation de l'Union qui est la hiérarchie des déchets, en revanche aucune condition particulière n'est requise sur le traitement des déchets des installations de production d'énergie renouvelable en fin de vie.

[9] Égale à la moyenne des bilans carbone de chaque type de module pondérée par les puissances crêtes de ces modules, en kg éqCO2/ kWc

1.2 Cadre national de l'installation et du démantèlement des éoliennes du code de l'environnement

Le cadre national du soutien aux parcs éoliens figure en annexe 4.

Avant 2010, les éoliennes étaient soumises à la procédure de permis de construire et à la nécessité de fournir une étude d'impact dans le cadre d'une enquête publique qui recensait l'ensemble des codes s'appliquant. Le cadre législatif de l'installation des parcs éoliens a fortement évolué avec la loi Grenelle 2 portant engagement national pour l'environnement du 12/07/2010 qui, à son article 90, a défini les zones de développement de l'éolien (ZDE), en réservant à ces zones l'installation de nouvelles unités, d'au moins cinq unités, et a fait basculer les éoliennes sous le régime des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) en modifiant les articles L.553-1 à 4 du code de l'environnement. La loi n° 2013-312 du 15 avril 2013 a ensuite supprimé les ZDE et les cinq unités, et prévu l'expérimentation d'une autorisation unique en matière d'ICPE, qui a été menée dans 7 régions, puis étendue à tout le territoire par la loi n° 2015-992 relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015. A partir de mars 2017, l'autorisation environnementale constitue une procédure unique qui intègre plusieurs autorisations : IOTA[10], ICPE, défrichement, dérogations espèces, Sites, etc… et fusionne, dans une même décision administrative, les procédures au titre des codes de la défense, des postes et communications électroniques, du patrimoine et des transports, précédemment portées par la procédure de permis de construire. Dans le même temps ont été définies les obligations en matière de démantèlement.

1.2.1 Les dispositions législatives

L'article L 553-1 du code de l'environnement prévoit le recours à la procédure des ICPE pour les éoliennes, soumises à autorisation pour celles dont la hauteur des mâts dépasse 50 m, et confirme la possibilité pour les installations disposant du régime antérieur d'être mises en services et exploitées. L'instruction est confiée au préfet selon des modalités renvoyées à un décret en Conseil d'Etat. Les installations soumises à autorisation sont au moins distantes de 500 mètres par rapport aux constructions à usage d'habitation, aux immeubles habités et aux zones destinées à l'habitation définies dans les documents d'urbanisme en vigueur**.**

L'article L.553-2 renvoie à un décret en Conseil d'Etat les règles d'implantation des éoliennes vis-à-vis des installations militaires et des équipements de surveillance météorologique et de navigation aérienne.

L'article L 553-3 prévoit que le démantèlement et la remise en état du site d'une installation éolienne sont de la responsabilité de l'exploitant, ou en cas de défaillance, de la société mère, quel que soit le motif de la cessation d'activité. Il prévoit la constitution obligatoire de garanties financières dès le début de la production, et pour les éoliennes relevant du régime des ICPE (rubrique 2980), en cas de manquement aux obligations de garanties financières, l'application des procédures de consignation et d'exécution d'office des travaux prévus à l'article L. 171-8 du code de l'environnement. Enfin il prévoit la constatation, par le préfet de département, de la carence d'un exploitant ou d'une société propriétaire pour conduire ces opérations.

[10] Projets soumis à autorisation au titre de la loi sur l'eau

1.2.2 Les articles R 553-1 à 8 du code de l'environnement (décret du 23 août 2011)

Pris pour l'application de l'article L.553-3 du même code, ces articles constituent une dérogation (art. R 553-5) aux conditions générales de la cessation d'activité des ICPE prévues par les article**s** L512.17, L512.19, L514.19 et L514.20 et R512-35, R512-38, R512-53, R512-74, R512-80 du code de l'environnement. Ils prévoient que la mise en service des installations éoliennes terrestres soumises au régime des ICPE est subordonnée à la constitution de garanties financières destinées à couvrir les opérations de démantèlement et de remise en état, et incluent les installations existantes à la date d'entrée en vigueur du décret dans les obligations qu'ils créent, dans un délai de 4 ans ; ils détaillent ces opérations :

a) Le démantèlement des installations de production ;
b) L'excavation d'une partie des fondations ;
c) La remise en état des terrains sauf si leur propriétaire souhaite leur maintien en l'état ;
d) La valorisation ou l'élimination des déchets de démolition ou de démantèlement dans les filières dûment autorisées à cet effet.

Enfin ils prévoient la notification par l'exploitant au préfet de département un mois à l'avance de l'arrêt définitif de l'installation, et des mesures pour assurer ces opérations, et en fin de chantier la réalisation par l'inspecteur des installations classées d'un procès-verbal de réalisation des travaux; ils renvoient à un arrêté du ministre chargé de l'environnement la fixation des conditions techniques de remise en état et des modalités de détermination du montant de la garantie financière, qui relève de l'arrêté d'autorisation de l'installation.

1.2.3 L'arrêté ministériel du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité éolienne au sein d'une ICPE

Il fixe les principales dispositions suivantes, applicables dans leur totalité pour les nouvelles autorisations et en partie pour les installations existantes, notamment :

1. La procédure s'applique aux demandes d'autorisation d'installations et aux extensions ou modifications d'installations existantes.
2. Les implantations vis-à-vis des zones habitées (500m), des bureaux (250m), des installations nucléaires (300m) et des radars et aides à la navigation et équipements militaires sont précisées.
3. Les éoliennes doivent être conformes à la norme NF EN 61400-1 ou toute norme équivalente en vigueur dans l'Union européenne *(à noter que cette norme prévoit que la durée de vie prévue à la conception doit être d'au moins 20 ans*).
4. La mise en place d'un suivi environnemental permettant d'estimer au moins une fois au cours des trois premières années puis tous les 10 ans, la mortalité de l'avifaune et des chiroptères due à la présence des éoliennes.
5. Les périodicités des contrôles de sécurité et des systèmes de l'éolienne, objet d'un rapport tenu à disposition de l'inspecteur des installations classées.
6. Les émissions sonores maximales admises.

1.2.4 L'arrêté ministériel du 26 août 2011 relatif à la remise en état et à la constitution des garanties financières pour les installations éoliennes

Il prévoit les conditions précises suivantes :

1. Le démantèlement des installations de production d'électricité, des postes de livraison ainsi que les câbles dans un rayon de 10 mètres autour des aérogénérateurs et des postes de livraison.
2. L'excavation des fondations et le remplacement par des terres de caractéristiques comparables aux terres en place à proximité de l'installation sur une profondeur minimale de:
— Trente centimètres lorsque les terrains ne sont pas utilisés pour un usage agricole au titre du document d'urbanisme opposable et que la présence de roche massive ne permet pas une excavation plus importante ;
— Deux mètres dans les terrains à usage forestier au titre du document d'urbanisme opposable ;
— Un mètre dans les autres cas.
3. La remise en état qui consiste en 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.
4. Les déchets de démolition et de démantèlement sont valorisés ou éliminés dans les filières dûment autorisées à cet effet.

L'arrêté renvoie à l'arrêté préfectoral la fixation du montant initial de garantie, sur base d'un coût unitaire forfaitaire par éolienne de 50.000 euros, et en fixe la formule d'actualisation à partir de l'indice de la construction TP01.
Cet arrêté est distinct dans sa formulation, des conditions prévues pour les autres ICPE, qui prévoient « La notification de l'exploitant au préfet indique les mesures prises ou prévues pour assurer, dès l'arrêt de l'exploitation, la mise en sécurité du site. Ces mesures comportent notamment : l'évacuation ou l'élimination des produits dangereux, et (pour les installations autres que les installations de stockage de déchets) celle des déchets présents sur le site. »

1.3 Qualification, traçabilité, et transport et des déchets de parcs éoliens

1.3.1 Qualification et traçabilité des déchets

Selon la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), les éoliennes ne contiennent pas de déchets dangereux[11] , qui sont les seuls déchets sur lesquels le code de l'environnement impose des obligations de traçabilité sur les filières de gestion mobilisées (enfouissement, valorisation, recyclage, réemploi), via la tenue d'un registre de production et les bordereaux de suivi de déchets (décret n° 2005-635 du 30 mai 2005 et arrêté ministériel du 29 juillet 2005). En revanche, la gestion des déchets, dangereux et non dangereux, est tracée via le registre propre à chaque établissement producteur de déchets, rendu obligatoire par l'article R 541-43 du code de l'environnement et détaillé dans l'arrêté ministériel d'application du 29 février 2012. Ainsi il est possible de connaître les flux de déchets des parcs éoliens, en nature et quantité ainsi que leur destination et le traitement qui doit leur être appliqué. Il n'existe pas d'observatoire dédié aux déchets issus de la filière éolienne ; toutefois la gestion des déchets au sens large, incluant les déchets issus de cette filière, est suivie via un observatoire mis en place au niveau de chaque région.

1.3.2 Transport des déchets

Compte tenu de la masse de matériaux à transporter (169 t/MW pour l'éolienne terrestre et 455t/MW pour les fondations selon l'Ademe[12]), et du coût de transport, l'équilibre économique du

[11] À l'exception d'huiles de lubrification très spécifiques et en petite quantité

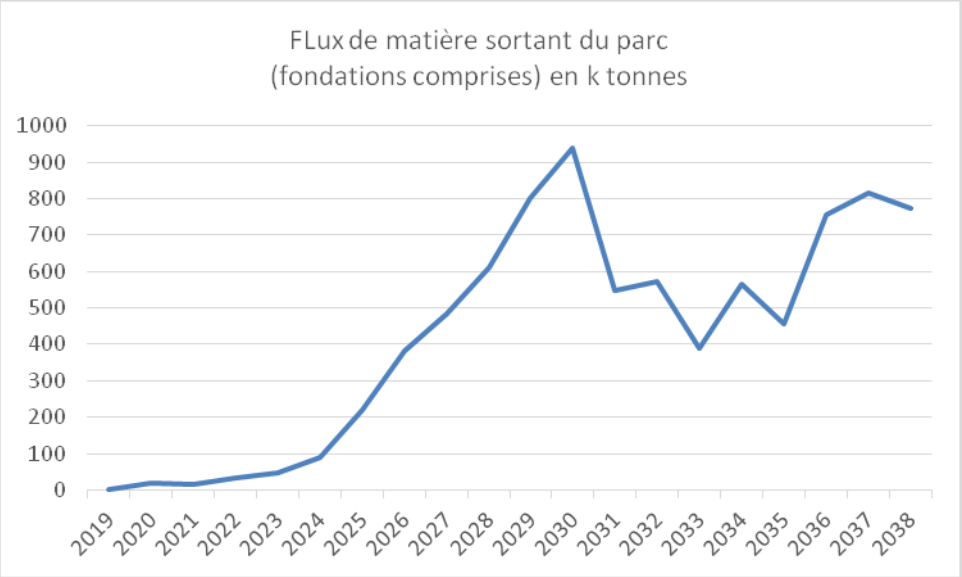
[12] Opportunités de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien ADEME, I Care environnement 2015

démantèlement nécessite le recours à un maillage suffisamment fin de sites de collecte et de tri (cf. partie 4), notamment pour les matériaux pondéreux peu ou non valorisés comme le béton et surtout les pales. Les transferts transfrontaliers de déchets sont régis par la convention de Bâle du 22 mars 1989, transposée dans le droit européen par le règlement n°1013/2006 du 14/06/06. En première analyse, il n'y aurait pas de code "Bâle" pouvant convenir pour les déchets de pales, donc ceux-ci seraient à considérer comme "hors liste" et soumis à une procédure de notification pour accord des autorités compétentes, auprès du pays d'import et du pays d'export. Dans le cas d'export, ces déchets pourraient être exportés pour valorisation vers un autre Etat-membre de l'UE, vers un pays de l'AELE, ou vers un pays OCDE. Si l'exportation a lieu pour de l'élimination (comme l'enfouissement), elle ne sera possible que vers un autre Etat-membre de l'UE ou vers un pays de l'AELE. Dans le cas de l'import, nous accepterions ces déchets sur notre territoire sans restrictions d'origine pour valorisation et élimination. A ce stade aucun transfert transfrontalier pour ce type de déchets n'a été constaté depuis 2016, date de sa mise en place, ni à l'import ni à l'export.

2 ESTIMATION DES FLUX MATIERES ISSUES DU DEMANTELEMENT DES PARCS EOLIENS

2.1 Les masses de matières issues du démantèlement des parcs éoliens

L'étude ADEME de 2015[13], en considérant une durée de vie moyenne des parcs éoliens de vingt ans, propose une première quantification des flux de matières sortant du parc, en distinguant celles produites par l'aérogénérateur, et celles issues des fondations.



Titre : Masse totale annuelle de matières issues du démantèlement des éoliennes terrestres, fondations comprises
Source : Ademe jusqu'en 2015, et mission sur la base de données Observ'ER à partir de 2015

En se fondant sur les données ADEME[14] jusqu'en 2013, puis sur les données fournies par Observ'ER [15] concernant les parcs éoliens mis en place entre 2014 et 2018, la mission a complété l'évaluation des flux de matières issues du démantèlement des parcs éoliens (aérogénérateurs et fondations) sur la période 2019-2038.

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

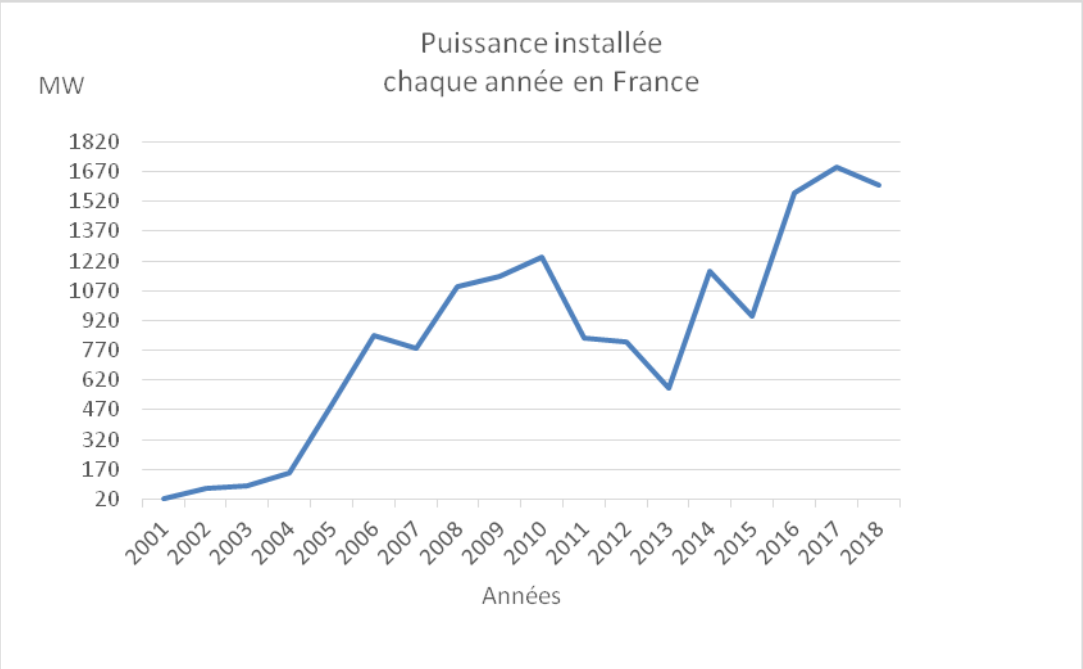
Titre : Par matière, masses annuelles issues du démantèlement des éoliennes terrestres
Source : Ademe jusqu'en 2015, et mission sur la base de données Observ'ER à partir de 2015

[13] Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, ADEME, mai 2015.

[14] Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, ADEME, mai 2015.

[15] Observ'ER 2018 - Journal de l'éolien n°29

Quelques points saillants méritent d'être soulignés :
- 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, et passent par un maximum en 2030, puis décroissant pendant 4 à 5 ans, avant d'augmenter de nouveau. Ces variations sont dues à l'évolution des puissances installées 20 ans auparavant (voir ci-dessous) ; cependant, la masse totale moyenne (fondations comprises) des éoliennes par MW passe de 624 tonnes avant 2015 à 486 tonnes après 2015, selon l'ADEME[16], et ainsi la masse des matières produites en 2038 est inférieure à celle de 2030, alors que la puissance éolienne installée en 2018 est supérieure à celle de 2010[17].



Titre : évolution de la puissance éolienne installée chaque année (MW)
Source : Source Données et études statistiques, tableau de bord éolien, MTES de 2018, jusqu'en 2015, puis Observatoire de l'éolien 2018 de Bearingpoint pour 2016 et 2017, en enfin Le journal de l'éolien onshore et offshore pour 2018

2.2 Les spécificités des différentes technologies d'éoliennes

Plusieurs technologies d'éoliennes terrestres ont été mises en œuvre par les constructeurs au cours de cette période :

(1) trois variantes pour la chaîne électromagnétique :

[16] Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, ADEME, mai 2015.

[17] Si, pour les éoliennes de plus de 5 MW, on n'observe pas de diminution significative du poids de l'aérogénérateur rapporté à la puissance unitaire par rapport aux éoliennes de faible puissance (on revient à des valeurs comprises entre 60 et 80 tonnes /MW), l'évolution principale a concerné la masse des fondations dont les caractéristiques dépendent au premier chef des contraintes géologiques du terrain d'implantation et du poids en tête de mât (à savoir l'aérogénérateur).. Le rehaussement du poids de l'aérogénérateur rapporté à l'unité de puissance, et l'inconnue à terme sur le poids des autres composants qu'elle emporte, renforce l'enjeu du recyclage à long terme pour la filière sans qu'il soit possible, au-delà de l'échéance prise pour le présent rapport, de le chiffrer.

- avec génératrice asynchrone et multiplicateur. Elles comportent toutes des rotors bobinés (contrairement aux éoliennes en mer) et représentent 67 % des éoliennes.
- avec génératrice synchrone à entrainement direct. Elles comportent en général des rotors bobinés (30 % des éoliennes au total), plus rarement des aimants permanents (3 % des éoliennes au total)

(2) deux variantes de mâts :
Les éoliennes avec génératrices asynchrones (67% des éoliennes, voir ci-dessus) sont parfois installées sur des mâts en béton (10% des cas au total), et plus souvent sur des mâts en acier (57 % des cas au total).

Il y a donc quatre principales technologies d'éoliennes terrestres dont les compositions matière sont synthétisées ci-dessous.

Technologies / Flux matière			- Synchrone - Sans aimant - Mât acier	- Asynchrone - Mât acier			- Asynchrone - Mât béton	- Synchrone - Avec aimant - Mât acier	Moyenne pondérée des technologies
			Type Enercon	Type Vestas	Type Gamesa	Moyenne	Moyenne	Type Vestas	
	Hypothèses de répartition des technologies		30 %	16 %	5 %	36 %	10 %	3 %	
Aéro-générateur	Acier	t/MW	124,4	86,3	95,5	90,9	56,4	81,6	97
	Fonte	t/MW	31,8	12,6	19,2	19,1	17,1	21,9	22
	Cuivre	t/MW	5,1	1,4	1,5	2,2	1,5	1,6	3
	Aluminium	t/MW	0,6	3,6	NR	2,6	1,7	1,1	2
	Composite	t/MW	12,6	8,7	9,0	9,6	10,7	15,0	11
	Béton	t/MW	-	-	-	-	343,9	-	34
	Aimant permanent	t/MW	-	-	-	-	-	0,16	0,004
	Total aéro-générateur	*t/MW*	*175*	*113*	*125*	*124*	*464*	*121*	*169*
Fondations	Acier	t/MW	23	20	19	20	19	15	21
	Béton / Ciment	t/MW	474	453	369	414	389	301	434
	Sable	t/MW	-	-	-	-	-	-	-
	Total fondations		*497*	*473*	*388*	*434*	*408*	*316*	*455*

Titre : Composition matière des différentes technologies d'éoliennes
Source : Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, ADEME, mai 2015

En moyenne, les proportions de matières issues du démantèlement des éoliennes au cours de la période 2019-2038 seront les suivantes en supposant que les fondations soient totalement excavées :

	Proportion sur la période (%)	Flux en 2030 en tonnes	Flux total 2019-2038 en tonnes
Béton	75,0	712725	6446578
Acier	18,9	165789	1546113
Fonte	3,5	35875	313643
Composite	1,8	17062	153611
Cuivre	0,5	4149	35343
Aluminium	0,3	3033	28593
Aimants permanents	$3,85 \times 10^{-3}$	36	330
Total	100	938669	8524211

Titre : Flux de matières issues du démantèlement des parcs éoliens
Source : Mission à partir des données ADEME, mai 20154

2.3 Les durées de vie des éoliennes et leurs calendriers de démantèlement

Le calendrier du démantèlement des éoliennes dans les prochaines années dépendra des choix qui seront faits par les exploitants à l'issue de la période de validité de tarifs de rachat (15 ans pour les éoliennes raccordées avant 2016) :
- soit continuer l'exploitation malgré les coûts de maintenance croissants, en vendant l'électricité au tarif du marché,
- soit démanteler l'installation définitivement ou pour en reconstruire une neuve sur le même site.

La mission a eu connaissance de plusieurs opérations récentes de repowering, c'est-à-dire de réimplantation de nouvelles éoliennes sur un même site, en général dans le but d'augmenter l'énergie produite.

Nom du parc	Mise en service initiale	Date de repowering	Durée (années)
Glacière de Palisse	1982	2013	31
Lastours	1983	2010	27
La Désirade[18]	1992	2010	18
Marie-Galante[14]	1997	2013-2015	16
Petit Canal[14]	1998	2014	16
Donzière	1999	?	
Goulien	2000	2017	17
Souleilla	2001	?	
Plouyé	2002	2017	15
Côte de l'Epinette	2002	2017	15
La Roque-Riols	2004	Contentieux	
Cham Longe II	2005	2020	15

Titre : Opérations récentes de repowering
Sources : Quadran, Kallista

[18] Guadeloupe.

Les parcs les plus anciens (1982-1983) de cette liste ont eu des durées de vie élevées (environ 30 ans), alors que les parcs plus récents sont « repowerés » au bout d'environ 15 à 17 ans. Une des raisons peut être que le tarif de rachat de l'électricité entre 2001 et 2006 était fortement dégressif (jusqu'à 28 €/MWh pour les éoliennes fonctionnant le plus grand nombre d'heures par an[19]) après les cinq premières années.

Le Syndicat des Energies Renouvelables (SER), après échanges avec ses membres, formule les hypothèses sur le taux de démantèlement des parcs éoliens (voir ci-dessous)

Taux de démantèlement à la 15ème année	Taux de démantèlement à la 20ème année	Taux de démantèlement à la 25ème année
30%	80%	100%

Titre : Taux de démantèlement à différentes échéances
Source SER : Note à la mission

Selon ce tableau, la durée de vie moyenne serait inférieure à 19,5 années.

La dynamique de démantèlement des parcs éoliens dans les prochaines années dépend fortement des hypothèses de durée de vie moyenne, comme le montre le graphique ci-dessous, avec trois hypothèses de durée de vie (15 ans, 20 ans, 25 ans).

Flux total matière (kt)	2018	2019	2020	2021	2022	2023
15 ans	46,20	90,29	221,32	381,26	483,80	612,04
20 ans	0,13	3,38	18,90	15,36	33,77	46,20
25 ans	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	0,13

Titre : Flux de matières 2018-2023 avec différentes hypothèses de durées de vie moyenne des parcs éoliens
Source : Mission à partir des données ADEME, mai 2015

Les parcs de Goulien, Plouyé, Côte de l'Epinette, démantelés et repowerés en 2017-2018, avaient initialement une puissance de 6MW, 3MW, et 1,5MW, soit un total de 10,5MW. La déconstruction a généré environ 6,5 k t de matériaux, essentiellement du béton, ce qui situe le flux de matière 2017-2018 entre les courbes 15 et 20 ans.

Sur la base des considérations précédentes, la mission a estimé intéressant de présenter une estimation des flux totaux de matières issues des démantèlements avec une hypothèse de durée de vie de 18 ans pour les parcs éoliens qui seront démantelés dans les 10 années qui viennent

Années	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Flux totaux en k tonnes	15	34	46	90	221	381	484	612	801	939

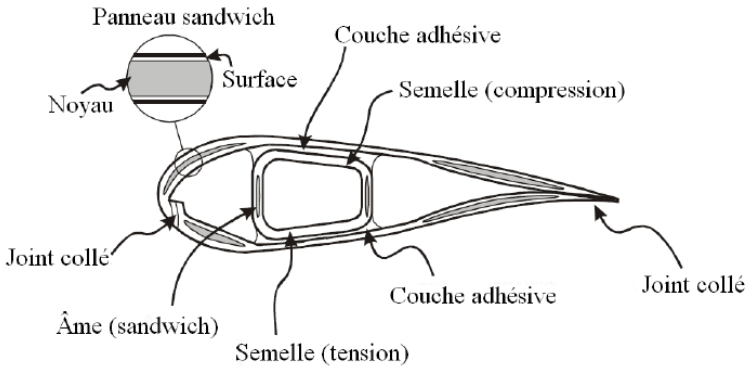
Titre : Flux totaux de matières issues des démantèlements (k tonnes)
Source : Mission à partir des données Ademe, mai 2015

2.4 La composition des composites des pales des éoliennes

La plupart des éoliennes de grande taille sont conçues avec :

[19] Arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent

- un longeron porteur (caisson intérieur constitué de semelles et âmes) qui assure l'essentiel de la résistance de la pale ;
- des surfaces aérodynamiques



Titre : coupe d'une pale d'éolienne

Source : Forcier LC *Conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale*, Mémoire maîtrise Génie Mécanique, ETSU Québec, 09/2010

Les matériaux composites représentant de 80 à 90 % de la masse totale d'une pale depuis les années 1990, ils concentrent toutes les difficultés de recyclage. Leur matrice est constituée de résines thermodurcissables : époxy, polyester, vinyester…Les pales comportent aussi divers matériaux : des colles à base époxy, une âme sandwich à base de bois (balsa), de mousses etc., des revêtements, et un système de protection contre la foudre (grille cuivre ou autres métaux)[20].

Les composites des pales sont élaborées quasi exclusivement avec des fibres de verre, qui représentent environ 40% du poids des pales. Seules les pales les plus récentes, de dimensions importantes (80 à 100 mètres), et celles destinées à l'offshore, comportent une proportion élevée de composites renforcés avec des fibres de carbone, plus facilement recyclables.

2.5 Le contenu en terres rares des aimants permanents

Comme indiqué plus haut (§2.2), seules certaines technologies d'aérogénératrices synchrones à entrainement direct (comme la V112 de Vestas) comportent des aimants permanents, qui contiennent environ 30% de terres rares ; les composants électroniques incluent une très faible proportion de terres rares qui sera négligée dans la suite. Les proportions de néodyme, de praséodyme, de dysprosium et de terbium dans les aimants permanents (voir §4.6) sont présentées dans le tableau ci-dessous en masse.

La masse des aimants permanents dans les aérogénératrices synchrones à entrainement direct qui comportent des aimants permanents fait l'objet d'évaluations variées : 160 kg/MW selon l'Ademe[21], 600 kg/MW selon le BRGM[22], 820 kg/MW selon la *Technical University of Denmark*[23], de 600 kg/MW à 1000 kg/MW selon le Syndicat des énergies renouvelables (SER)[24]. La mission a retenu 800 kg/MW pour élaborer les tableaux ci-dessous.

[20] Note de synthèse transmise à la mission par le centre technique « Innovation, plasturgie, composites » Pale éolienne – Design et matériaux par P. Francescato

[21] Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, ADEME, mai 2015

[22] Les terres rares, Enjeux des géosciences, janvier 2017

[23] Wittrupt, Sanne, Permanent magnets cause production problems, 1/11/2011

[24] SER, note à la mission, avril 2019

Selon le SER et l'ADEME, la part des aérogénératrices synchrones à entrainement direct avec aimants permanents est de 3% dans le parc français ; le *Department of Energy* US[25] confirme cet ordre grandeur : ce type d'éolienne représenterait 5% du marché mondial.

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

Titre : Terres rares issues du démantèlement des parcs éoliens
Source : Mission à partir des données ADEME, mai 2015

Le néodyme et le dysprosium figurent dans les matériaux critiques identifiés par la Commission européenne[26]

Terres rares	Producteurs	Production mondiale 2014 d'oxydes(tonnes)	Réserves (en k tonnes)	Réserves en années de production	Prix (avril 2017) en $/kg
Dysprosium	Chine (97%), Australie (1,3%)	1450 de Dy_2O_3	690	475	265
Néodyme	Chine (87%), Australie (5%), Etats-Unis (3,3%), Russie (1,9%)	23800 de Nd_2O_3	Entre 9 300 et 13 500	Entre 400 et 550 ans	56

Titre : Sources, production et réserves du dysprosium et du néodyme
Source : BRGM, Fiche de synthèse sur la criticité des métaux, août 2016

Le praséodyme est contenu en petites quantités dans la croûte terrestre (9,5 ppm). On le trouve dans les minerais de monazites (essentiellement en Australie, au Brésil, en Chine, en Inde, en Malaisie, en Afrique du Sud), et de bastnaésite (essentiellement en Chine et aux Etats-Unis). Beaucoup moins abondant que le néodyme dont il doit être séparé, le praséodyme est dispersé et le rendement de la purification est faible. L'offre de praséodyme a toujours dépassé la demande. Son cours était d'environ 80$/kg en avril 2017.

Le terbium est extrait du sable de monazite (teneur d'environ 0,03 %, voir ci-dessus la localisation des ressources connues de monazite). Son abondance dans la croûte terrestre est estimée à 1,2 mg/kg. Les principales ressources minières sont situées en Chine, aux États-Unis, au Brésil, en Inde, au Sri Lanka et en Australie. Les réserves en terbium étaient estimées en 2001 à 300 000 tonnes et la production mondiale est d'environ 10 tonnes par an (soit 30 000 années de réserves). Son cours en avril 2017 était de 580$/kg.

[25] Chu Steven, Critical Materials Strategy, *United States Department of Energy*, December 2011.

[26] Critical Metals in Strategic Energy Technology, Commission européenne.

Terres rares produites par le démantèlement des éoliennes	Valeur en 2030 (k US$)	Valeur cumulée 2011 à 2038 (k US$)
Néodyme	420	3890
Praséodyme	210	1920
Dysprosium	145	1325
Terbium	60	580
Total	835	7715

Titre : Valeur totale des terres rares issues du démantèlement des parcs éoliens
Source : Mission

Ainsi la valeur des terres rares issues du démantèlement des éoliennes en 2030, correspondant au pic de production sur la période serait de 835 000 $, sur la base des cours en 2017. Les terres rares issues des parcs éoliens démantelés en France ne justifieront pas à elles seules une usine de traitement des aimants permanents, qui nécessiterait d'autres sources que les parcs d'éoliennes démantelées.

3 ENJEUX DE LA FIN DE VIE ET POSITION DES ACTEURS

3.1 Des enjeux à concilier voire à arbitrer, bref état des lieux

La description du cadre réglementaire permet de situer la filière face aux enjeux environnementaux parmi lesquels la fin de vie et l'économie circulaire d'une part, le développement des énergies renouvelables d'autre part. On peut notamment souligner que:

- La filière est en croissance et compte tenu de l'âge du parc, les retours d'expérience de fin de vie sont peu nombreux. La mission a particulièrement étudié deux démantèlements récents, qui ne sauraient être représentatifs des pratiques futures appelées à se généraliser. Les opérations de démontage font appel à des techniques disponibles sur le marché français (levage, grutage et transport exceptionnel), 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 cf. §4). L'enfouissement ne concerne à ce stade que le béton (en partie) les pales en composite, et, en petite quantité, les terres rares des aimants permanents (cf. parties 3, 4 et 5). La valorisation thermique des pales en cimenterie, généralisée en Allemagne (où l'enfouissement est interdit), est également pratiquée en France. A noter enfin que plusieurs acteurs se prononcent en faveur d'un démontage total des massifs d'ancrage en béton armé, qui va au-delà des exigences réglementaires en France, alors qu'il est requis en Allemagne dans certains länder[27].

- La durée de vie des éoliennes n'est fixée ni réglementairement, ni contractuellement : seul le soutien public est déterminé, d'une durée initiale de 15 ans, passée à 20 ans aujourd'hui. La fin de vie est donc déterminée par le choix individuel de l'exploitant du site, sur des critères avant tout économiques, sachant que les coûts de fonctionnement sont élevés (de 50 à 80K€/éolienne/an environ[28], croissant en fonction de l'âge de l'éolienne), et que les modalités du soutien ont fortement évolué pour les grosses installations soumises à autorisation, ce qui a réduit le nombre de projets candidats[29].

- Dans les cinq prochaines années selon l'ADEME, environ 1500 turbines (environ 2GW) vont arriver au terme de leur contrat d'obligation d'achat et se trouver confrontées aux options de fin de vie : soit l'arrêt définitif à un moment clé (fin de la période de soutien, ou avant, ou après prolongation quelques années), soit le *repowering,* qui permet aux exploitants de conserver des sites naturels favorables à l'éolien, d'y implanter de nouvelles machines plus performantes et de bénéficier de nouveaux tarifs d'achat.

- Le renouvellement des éoliennes est clairement identifié comme un des leviers pour permettre d'atteindre les objectifs ambitieux fixés par le projet de PPE. Toutefois, tous les parcs actuels ne pourront y accéder, compte tenu des servitudes de télécommunications, aéronautiques ou militaires qui ont pu entretemps restreindre les conditions d'implantation. Compte tenu des impacts constatés sur la biodiversité, le *repowering* devra également tenir compte de la

[27] Cf. OFATE Démantèlement des éoliennes en Allemagne et en France février 2019 cas delà Rhénanie du Nord-Westphalie

[28] L'exploitant passe un contrat de maintenance avec le constructeur ou avec une société dédiée

[29] CRE Rapport de synthèse du 12 juillet 2018 Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production de l'électricité à partir de l'énergie mécanique du vent implantées à terre.

protection souhaitable des Zones de Protection Spéciales de la Directive Oiseaux et des Zones Spéciales de Conservation désignées sur les chiroptères par la Directive Habitats Faune Flore.[30]

- L'obligation de mettre en place un matériel neuf pour bénéficier d'un soutien financier, certainement souhaitable sur le plan de la sécurité des machines, limite au sein de l'Union le marché de la réutilisation après reconditionnement[31], première priorité dans la hiérarchie du traitement des déchets. Ce marché se limite donc à des pièces détachées pouvant entrer dans la réparation ou l'entretien de machines déjà en place (éléments de génératrices et les pales), et est occupé par les fabricants au niveau européen, ou par des entreprises de revente. Un enjeu serait de positionner des entreprises françaises sur ce marché pour permettre à la fois le maintien en état des parcs et la création de valeur en France. (cf. partie 4).

- Il n'existe pas de label de durabilité dans la filière éolienne, ni de méthodologie d'ACV[32] commune à cette filière dans l'Union, et selon les réponses obtenues par la mission, pas de volonté collective affirmée pour produire un tel référentiel, même si certains constructeurs produisent des ACV de leurs machines et si l'Ademe a publié une étude d'ACV de la filière[33]. Cette étude donne une très bonne empreinte carbone globale de la filière éolienne terrestre (12,7g/kWh), essentiellement concentrée sur « la fabrication des composants qui nécessite une grande quantité d'énergie issue de ressources fossiles ». Fondée sur la norme ISO14040-14044, et sur des données et hypothèses de recyclage globales pour l'éolien en mer et l'éolien terrestre, elle constitue une première approche, mais ne saurait se substituer à une démarche d'application obligatoire dans l'UE pour chaque éolienne produite, comparable à ce qui se fait par exemple sur les produits de construction[34], qui pourrait tenir compte des données liées à la France, et inciter la filière à afficher et faire diminuer son empreinte environnementale globale, notamment son impact carbone, également très lié au scénario de fin de vie

- L'Ademe a effectué une étude sur la filière éolienne[35], ainsi qu'une étude sur l'économie circulaire dans cette filière[36], qui concluent à son réel potentiel en matière d'économie circulaire. L'Ademe produira un prolongement de cette étude pour la mi-2019, concernant notamment la durée de vie économique des projets (à partir de laquelle les dépenses d'exploitation dépassent le prix de marché de l'électricité produite), la capacité sortante en MW en fin de vie et les flux de matières à attendre d'ici 2020/2030, Elle produira aussi un parangonnage européen des pratiques et coûts de démantèlement de l'éolien terrestre (Allemagne, Danemark et Espagne).

---

[30] Cf. Cahier d'acteurs de la Ligue de Protection des Oiseaux. Débat Public PPE. CNDP mars à juin 2018.

[31] Le reconditionnement se définit comme le démontage, la restauration ou le remplacement de composants, leur test de manière isolée puis le test du système reconditionné, pour un fonctionnement et une garantie égaux voire supérieurs à ceux du produit neuf. Cf. Etude de faisabilité d'une plate- forme des activités de fin de vie d'une éolienne en Champagne Ardenne DREAL Grand Est 25/11/2016

[32] Analyse de cycle de vie

[33] Cycleco 2015 « Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France », Rapport final. ADEME.

[34] Une fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) est un document normalisé qui présente les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie d'un produit ainsi que des informations sanitaires dans la perspective du calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son écoconception en application du Règlement européen sur les produits de construction. Elle prend en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, de l'extraction des matières premières à sa fin de vie, sans oublier les transports, la mise en œuvre et l'usage même du produit (« cradle to grave »).

[35] Etude sur la filière éolienne française ADEME E-CUBE, I Care et Consult, In Numeri 2017

[36] Opportunités de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien ADEME, I Care environnement 2015

3.2 Initiatives prises et positions des acteurs

Diverses initiatives visent à anticiper les bonnes pratiques de démantèlement et de recyclage, et à structurer des entreprises sur le remplacement des pièces ou la fin de vie des éoliennes.

Au plan national :
Le Syndicat des Energies Renouvelables a adressé une contribution qui considère que « La filière éolienne applique déjà les principes de l'économie circulaire lors de la conception des éoliennes et des parcs éoliens », et fait valoir que l'amélioration en continu de ses performances passe par l'optimisation des flux logistiques (avec pour exemple la construction de l'usine de mâts en béton ENERCON dans l'Oise au plus près des sites d'implantation, l'écoconception des éoliennes et l'optimisation des flux de matières , et l'augmentation de leur durée de vie, ainsi que par une démarche multisectorielle de recyclage des composites. Enfin, « le retour d'expériences des premiers projets démantelés par les entreprises adhérentes du SER démontre que le montant de la garantie financière de démantèlement, fixé à 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. »

La contribution de France Energie Eolienne précise que les opérateurs français privilégient à ce stade le démontage par grue, moins impactant que celui par chute pratiqué en Allemagne ; elle indique que « *au-delà du cadre réglementaire, plusieurs développeurs/exploitants s'engagent en amont à excaver intégralement le massif de fondation (hors pieux). Certains le font aussi lorsqu'ils souhaitent faire un repowering au même emplacement, mais avec une éolienne plus haute et de modèle différent, nécessitant systématiquement une nouvelle fondation (enjeu de certification de la fondation, notamment)* ». La provision de 50K€ est dans ce cadre considérée comme suffisante. Les pistes d'avenir identifiées sont l'augmentation de la durée de vie, et l'amélioration du recyclage. Sur le premier point, les constructeurs pourraient organiser le prolongement à 25-30 ans moyennant des programmes de maintenance adaptés, qui sont renégociés avec les fabricants ou des prestataires en fin de soutien. Sur le second point, un aspect clé est l'optimisation par écoconception des pales, qui ne représentent que 3% de la masse de l'éolienne, mais 30% des coûts, notamment du fait de l'importance des déchets de fabrication évalués à 30% en volume. Un autre aspect est la R&D pour des résines recyclables et le recyclage des aimants permanents[37]. Certains constructeurs se sont déjà donné des objectifs quantitatifs de réduction des déchets non recyclables, avec un travail régional (Grand Est et Occitanie) pour valoriser localement les déchets de béton, et plus généralement pour structurer un écosystème d'entreprises spécialisées en démantèlement-recyclage. Pour les pales actuelles, la FEE défend l'incinération en cimenterie, ou la pyrolyse dont le pionnier est une entreprise danoise (cf. partie 4). FEE soutient également la plate-forme AD3R, également soutenue par l'Ademe, qui a pour objet la création sur le quart Nord-Est d'une nouvelle filière française de démantèlement-recyclage-reconditionnement et de revente des éléments éoliens.

Au plan européen :
En 2017 l'association WIND Europe qui réunit les constructeurs européens d'éoliennes a publié deux positions[38] qui identifient diverses pistes sur l'insertion de la filière dans une démarche vertueuse d'économie circulaire ; celles-ci mettent l'accent sur les enjeux déjà identifiés de l'écoconception des turbines (réduction de l'empreinte carbone et des déchets, modularité des composants, allongement de la durée de vie pour les composants ou la turbine entière, choix de

[37] Projets Dreamwind Effiwind initié par l'ADEME et le Conseil régional d'Aquitaine, projet européen Walid, projet CEA Tech

[38] "Discussion paper on managing composite blade waste" et "Background paper on the environmental impact of wind energy a contribution to the circular economy discussion" Wind EUROPE march 2017

matières premières recyclables ou biosourcées), de la synergie entre fabricants et industriels du traitement des déchets (ex : symbiose industrielle à Kalundborg[39]), du transport par rail ou voie d'eau et de l'utilisation d'énergie renouvelable photovoltaïque sur le chantier, de la maintenance (solutions de maintenance prédictive pour réduire les déplacements, reconditionnement et remplacement de pièces), enfin du recyclage (pales). Il ne semble pas avoir été donné de suite concrète à ces initiatives à ce stade dans l'encadrement juridique de la filière.

[39] A Kalundborg au Danemark a été mise en place une symbiose entre le secteur industriel et la ville qui permet d'optimiser les flux d'énergie, d'eau et de déchets.

4 ECONOMIE GENERALE DES FILIERES DE TRAITEMENT DES EOLIENNES EN FIN DE VIE

Les principes sur lesquels doit se fonder le traitement des parcs éoliens en fin de vie sont directement issus de la directive européenne n°2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets, traduite en droit français par l'ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 et la loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissante verte.

Pour favoriser l'évolution vers une économie circulaire, la production et le traitement des déchets issus d'un démantèlement doivent respecter une hiérarchie de solutions, par ordre décroissant de préférence (article 4 de la directive) :

- prévention et réduction en amont de la production de déchets ;
- réutilisation des parties aptes au réemploi (« seconde vie ») ;
- recyclage matière des matériaux ;
- autres formes de valorisation des matériaux, essentiellement la valorisation énergétique ;
- élimination par mise en décharge.

La prévention de la production de déchets issus des éoliennes est de la responsabilité des fabricants d'éoliennes et des exploitants de parcs. Les autres solutions ressortent de la maîtrise d'œuvre des opérations de déconstruction/démantèlement, en règle générale une entreprise du secteur du recyclage et du traitement des déchets.

4.1 Prévention et réduction de la production des déchets d'éoliennes

Ces deux principes peuvent se concrétiser de deux façons :
-réduire l'utilisation de matières premières lors de la conception et de la fabrication des éoliennes ;
-allonger la durée de vie des éoliennes.

Pour la <u>conception et la fabrication des éoliennes</u>, le facteur déterminant est la quantité de matière utilisée par MW installé.
Le tableau suivant donne des éléments de comparaison pour des éoliennes de 2 à 4,5 MW, en se limitant à la partie productive nacelle + rotor[40] (les éoliennes Senvion-MM92 , Vestas V-90 et Enercon E-82 sont les trois modèles les plus implantés en France ; le modèle Enercon E-115 n'est implanté qu'en Allemagne) :

[40] Le poids du massif de béton est d'environ 1000t dans les trois premiers cas. Celui du mât est d'environ 200t (fourchette de 155 à 235t, variable selon les modèles et non directement lié à la puissance). Pour ces deux objets, les matériaux constitutifs (acier et béton) ne sont pas ceux qui posent les problèmes de valorisation les plus aigus (cf infra).

Type d'éolienne	Puissance (en MW)	Diamètre du rotor (en m)	Poids nacelle et rotor (en t)	Poids/MW (en t)
Senvion MM-92	2	92	112	56
Enercon E-82	2,3	114	135	59
Vestas V-90	3	90	108	36
Vestas V-112	3,5	112	130	37
Enercon E-115	4,2	115	196	47

Titre : Caractéristiques de différents types d'éoliennes

L'« efficacité massique » d'une éolienne est donc très variable selon le modèle retenu, et il n'y a de gain d'échelle qu'au passage de 2 à 3 MW, cette diminution ne se poursuivant pas pour des éoliennes de plus forte puissance.
Il sera intéressant d'en tenir compte dans les appels d'offres de la CRE.

L'allongement de la durée de vie des parcs éoliens réduirait automatiquement la quantité annuelle de déchets à traiter. Actuellement, lorsqu'il arrive au bout de la période de tarif garanti (15 ans pour les éoliennes raccordés avant 2015 et bénéficiant des arrêtés tarifaires alors en vigueur ; 20 ans depuis 2015 pour les éoliennes issues des appels d'offres), l'exploitant peut :

- poursuivre l'exploitation du parc existant et vendre l'électricité produite au prix du marché ;
- ou arrêter cette exploitation et implanter un nouveau parc sur le même site (opération dite de « repowering »), en posant sa candidature à un nouvel appel d'offres pour bénéficier à nouveau d'une compensation tarifaire.

Son choix dépend de plusieurs facteurs : prix anticipés du marché de l'électricité, état des équipements existants, coûts anticipés de leur maintenance… Si la stratégie industrielle sous-jacente est du seul ressort de l'exploitant, il n'en reste pas moins vrai que fermer et démonter une installation en état de fonctionner s'apparente à de l'« obsolescence anticipée » génératrice de déchets. Il peut être discuté que l'Etat soutienne, fût-ce de manière indirecte au travers de ses mécanismes de soutien aux énergies renouvelables, de telles décisions.

4.2 Conditions économiques et industrielles de mise en place d'une filière industrielle de recyclage des éoliennes

La France dispose d'un nombre significatif d'industriels du recyclage en capacité d'assurer la maîtrise d'œuvre de chantiers de démantèlement des éoliennes et de valorisation des matériaux qui en sont issus.
On peut citer, à titre d'exemple et sans exhaustivité : deux grandes entreprises, Suez (CA déchets et recyclage en France: 3,5G€) et Veolia (2,2 G€) et plusieurs entreprises de taille intermédiaire (ETI) telles que Derichebourg environnement (CA : 2,1G€), Paprec (CA : 1,5G€), Séché (2500p. ; CA France : 500 M€), GDE (1300p. ; CA :1,2G€), Galloo (675p. ; CA : 615M€) et Praxy (2300p.; CA : 840M€)[41].

[41] Praxy est une société commerciale, associant une vingtaine d'entreprises du secteur du recyclage. Les chiffres donnés, en effectif et en chiffre d'affaires, sont les montants cumulés pour ces vingt entreprises.

La mission a rencontré les dirigeants de plusieurs de ces entreprises, qui sont à des stades différents de maturité par rapport au marché, encore naissant en France, du démantèlement et du recyclage des éoliennes[42].
Par ailleurs, plusieurs projets de créations d'entreprises et/ou de plates-formes spécifiques pour ce marché sont évoqués dans plusieurs régions ; le plus avancé semble être dans la région Grand Est celui de l'association AD3R (Association Démantèlement, Recyclage, Reconditionnement et Revente), dont la cheville ouvrière est l'entreprise de maintenance d'éoliennes NetWind (50 personnes).

Les entreprises du recyclage ne se lanceront sur ce nouveau marché que si elles ont la conviction de l'existence d'un marché conséquent en volume et de la possibilité d'y réaliser une marge opérationnelle satisfaisante, justifiant l'investissement de base nécessaire en capitaux et en moyens humains.

Concernant le marché en volume, il pourrait représenter un montant cumulé variant selon les estimations entre 210 et 440 M€ d'ici 2030, selon les calculs de la mission. Au-delà, son évolution dépendra de l'accroissement du parc éolien terrestre dans les années 2020-2030 (la programmation pluriannuelle de l'énergie PPE prévoit une multiplication de la puissance installée par 2,5 d'ici 2030).
Les professionnels du recyclage estiment les créations d'emplois dans le secteur à environ
5 ETP par M€ supplémentaire. Ce qui donnerait dans notre cas entre 105 et 220 emplois (environ) nouveaux générés par le démantèlement et le recyclage des éoliennes. Ces emplois se situant à proximité des parcs éoliens existants, les principales régions bénéficiaires seront les Hauts-de-France, le Grand Est et l'Occitanie[43], et dans une moindre mesure la Bretagne et le Centre.

La rentabilité opérationnelle que peut générer cette activité dépend du différentiel entre le coût des opérations de démantèlement/recyclage et le produit que peut en retirer le recycleur, résumés schématiquement dans le tableau suivant :

Coût des opérations	Produits
- Coût (équipement, main d'œuvre, pré-traitement sur place) du chantier de démantèlement : Cd - Coût d'élimination des matériaux à prix négatifs (composites, béton) : Cé	- Montant facturé à l'exploitant du parc : F - Vente de pièces détachées : Vp - Vente des métaux ferreux Vf et non ferreux Vnf

Titre : Définition des différents coûts et produits

Selon les calculs de la mission et à titre d'exemple, pour une éolienne de 3 MW :

[42] L'entreprise Guyot environnement, membre breton de Praxy, a à ce jour mené un chantier complet de démantèlement d'éoliennes avec valorisation des matériaux qui en sont issus.

[43] Soit trois régions à fort taux de chômage (pour la partie Languedoc concernant l'Occitanie).

Cd : suivant la complexité du chantier et les conditions, en particulier météorologiques, influant sur la durée d'immobilisation des grues pour intervention en hauteur, peut varier de 60k€ à 170k€. On prendra une valeur moyenne Cd= 110k€.
Cé : 1000t de béton, coût d'élimination 7,5€/t ; 33t de composites, coût d'élimination 150€/t[44] . Total Cé = 7500+4950= 12,5k€.
F : on retient la valeur du cautionnement. F= 50k€
Vp : cette valeur est provisoirement fixée à zéro.
Vf : 420t de fonte et ferraille à 100€/t. Vf= 42k€
Vnf : 9t de cuivre à 4000€/t et 6t d'aluminium à 500€/t. Vnf= 39k€

Au final, la marge opérationnelle se situe autour de 9k€, soit un peu plus de 7% des coûts supportés. Si on veut que ce marché intéresse des entreprises, il faut que l'environnement économique et industriel leur permette de maximiser leurs produits et de minimiser leurs coûts afin d'améliorer ce ratio, qui dépend de plusieurs aléas (en particulier le prix du cuivre, très volatil).

Les valeurs Vf et Vnf dépendent des prix (mondiaux) du marché des métaux. Le coût Cd dépend de facteurs de productivité internes à l'entreprise, sur lesquels l'Etat n'a pas prise (hors les mesures d'environnement économique générale favorables à une politique de l'offre telles que la baisse des charges fiscales et sociales, etc…)

L'intervention publique ne peut donc porter que sur les valeurs F (indirectement, via le montant du cautionnement) et Cé. Concernant ce dernier facteur, il s'agit d'aider à créer les conditions d'élimination à moindre coût, voire de valorisation, de matériaux aujourd'hui à prix négatifs (béton et composites ; cf. §4.3 et 4.4).
F dépendra à terme du contexte concurrentiel entre les différents recycleurs. Dans un premier temps, cette valeur est directement liée au montant du cautionnement. Augmenter ce montant permettrait donc d'améliorer la rentabilité de l'opération de démantèlement/recyclage et de faire démarrer ce marché aujourd'hui embryonnaire. Cela permettrait aussi d'amortir les aléas sur les valeurs Cd et Vf +Vnf.

Pour cela, on pourrait augmenter la valeur du cautionnement, selon une formule intégrant la masse de l'aérogénérateur[45].

<u>Le cas particulier de la revente de pièces détachées</u>

En fin de vie d'une éolienne, certaines pièces démontées, par exemple des composants mécaniques et électriques de la turbine, peuvent être en bon état de fonctionnement et pourraient être réutilisées sur d'autres parcs éoliens existants, en France ou à l'étranger.

[44] Ces hypothèses sur les coûts d'élimination des matériaux non recyclables sont discutées plus bas, dans les parties qui leur sont consacrées. On prend ici les valeurs observées sur quelques chantiers réalisés.

[45] Une telle formule pourrait être : F (en euros) = 50 000 + 70 M (M est, en tonnes, la masse de l'aérogénérateur, hors fondation), plafonnée à 100 000 euros.

La conditionnalité des soutiens à des installations neuves pratiquée depuis l'origine et réaffirmée dans les lignes directrices 2014/2020 conduit comme nous l'avons vu en parties 1 et 3 à limiter dans l'Union la réutilisation de pièces à l'entretien courant de parcs existants.
Ainsi, l'utilisation de pièces d'occasion n'est pas possible sur un parc nouveau en France (ou un parc issu d'une opération de repowering) souhaitant bénéficier d'un contrat d'achat et de la compensation tarifaire. Elle est donc réservée à de la maintenance sur des parcs existants[46].

Malgré cette limitation, plusieurs entreprises européennes se sont lancées sur ce marché, dont les deux principales sont Spares in Motion (Pays-Bas, plateforme e-business pour les pièces détachées d'éoliennes neuves et d'occasion) et Repowering solutions (Espagne, qui commercialise exclusivement des pièces d'occasion).
En France, seule Mywindparts, filiale de l'entreprise de maintenance éolienne NetWind, développe une activité naissante sur ce créneau (CA= 600k€). D'autres sociétés de maintenance pourraient prochainement s'y intéresser.

4.3 Valorisation des métaux (hors terres rares) issus des éoliennes

On l'a vu, le fer (fonte et acier), le cuivre et l'aluminium ont une valeur marchande et se recyclent sans problème dans les aciéries électriques (pour la ferraille) et les fonderies (pour les non ferreux).
Il n'y a pas non plus de difficulté concernant les capacités d'absorption de ces produits : la ferraille issue des éoliennes représentera à son pic 200kt en 2030, soit 1,5% de la quantité totale récupérée en France en 2018[47] . Le cuivre récupéré sera de 4kt en 2030 (2 % de la quantité recyclée en France) et l'aluminium de 3kt (0,5 % de la quantité recyclée).

4.4 Traitement du béton

Le béton issu de la déconstruction d'une éolienne a deux sources : le massif (fondations) sur lequel repose l'éolienne, et le mât, qui peut être en acier ou en béton.

Pour le béton des fondations, la réglementation n'impose pas systématiquement son excavation (cf. §1.3.4), ce qui ne fait pas obstacle à ce que l'obligation de celle-ci figure dans la convention, de droit privé, passée entre le propriétaire du terrain et l'exploitant du parc éolien en fin de vie. En pratique, dans le cas fréquent d'un repowering avec implantation à l'identique des nouvelles éoliennes, les anciennes fondations sont systématiquement enlevées, quelle que soit leur profondeur.

La masse de béton à recycler est estimée en 2030 à 710kt, soit 3,7% du béton réemployé en France en 2017 (19Mt).

[46] Ou à des parcs qui vendraient leur électricité au prix du marché sans compensation, cas aujourd'hui inexistant, mais qui pourrait se développer dans un avenir proche.

[47] Cette dernière est d'ailleurs exportée à hauteur de 40 % vers d'autres aciéries européennes.

En pratique, ces déchets de béton sont actuellement utilisés sur les chantiers de travaux publics comme sous-couches routières et remblais et comme matériaux de remblai des carrières (dont les exploitants ont l'obligation de combler les vides créés). Cette valorisation, qui n'est pas juridiquement du recyclage au titre de la directive européenne du 19 novembre 2008 relative aux déchets déjà citée, a un coût pour les recycleurs, évalué de 5 à 10€/t.

De manière plus ambitieuse, les acteurs du secteur se sont engagés depuis quelques années vers une autre forme de valorisation, plus ancrée dans la logique de l'économie circulaire : réutiliser les granulats issus du concassage du béton de déconstruction pour fabriquer à nouveau du béton présentant des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes.
C'est l'objet du projet Recybéton (2012-2018) associant plus de quarante acteurs industriels et scientifiques de la filière, dont les résultats ont été présentés fin 2018. Ils ont démontré qu'il était possible de dépasser les limites techniques actuelles (aujourd'hui, la réglementation permet déjà d'utiliser des granulats issus de béton recyclé à des taux allant jusqu'à 20% ou 30% selon la classe d'exposition du béton). Plusieurs opérations pilotes ont été menées avec succès, y compris sur des chantiers importants, comme par exemple des parties d'ouvrages d'art sur la voie de contournement Nîmes-Montpellier.

Au final, le béton issu de la déconstruction des éoliennes suit les filières de traitement du béton de déconstruction en général et ne présente pas d'autre impact environnemental dédié que les émissions de GES liées au transport routier ; il a cependant un coût, non négligeable eu égard aux quantités en jeu, pour les acteurs du démantèlement et du recyclage. Un véritable recyclage dans la filière de fabrication du béton lui-même est envisageable à moyen terme et permettrait d'améliorer l'équation économique de la déconstruction d'un parc éolien.

Par ailleurs, les constructeurs d'éoliennes pourraient envisager d'employer du béton recyclé sous réserve d'une garantie de tenue mécanique, comme cela semble être le cas en Allemagne.

4.5 Traitement des matériaux composites constitutifs des pales d'éoliennes

Les pales d'éoliennes, et dans une moindre mesure la nacelle, sont constituées de plusieurs matériaux différents et décrites en partie 2.4 :

- une matrice en polymère thermodurcissable (résine époxy ou polyester) ;
- des fibres de renforcement (fibres de verre et de carbone) insérées dans la matrice ;
- un cœur en bois léger (balsa) ou en mousse de PVC ;
- des matériaux d'assemblage : colles et vis.

Il s'agit donc d'une structure sandwich (juxtaposition d'une âme et d'une matrice renforcée) avec la présence d'un matériau composite. En poids, l'essentiel est représenté par le matériau composite, constitué à 50-60 % de fibres de renfort et à 50-40 % de résine. Les fibres de renfort sont des fibres de verre. Pour les éoliennes les plus puissantes (3MW et au-delà), on utilise en plus de la fibre de carbone, qui permet de rigidifier des pales de plus en plus longues.

L'énergie éolienne représente 7% du marché français des matériaux composites, soit 21kt/an[48] .
Pour les pales d'éoliennes en fin de vie, l'Ademe évalue le flux annuel de déchets à un maximum de 17kt en 2030. Il est difficile d'évaluer quel pourcentage de l'ensemble des déchets composites cela représentera[49]. La dynamique de ce marché est en effet forte (taux de croissance de 5 à 7% par an), ainsi que celle du démantèlement/recyclage des produits en fin de vie : à titre d'exemple, le nombre de bateaux de plaisance en composite en fin de vie pris en charge par la filière dédiée Apur devrait quadrupler entre 2019 et 2025, si les objectifs sont atteints.

Le traitement des matériaux composites issus des pales d'éoliennes ne présente pas de particularité par rapport au problème général de traitement de l'ensemble des déchets composites. Si on se reporte à la hiérarchie des traitements fixée par la directive déchets précitée, il faudrait d'abord favoriser le recyclage matière de ces matériaux, avant d'envisager leur valorisation énergétique, ultime solution permettant d'éviter leur mise en décharge.

4.5.1 La valorisation matière

Le mode de traitement optimal consisterait, par un procédé chimique ou thermique, à dissocier la matrice plastique et les fibres, dans le but de réintégrer ces produits dans de nouvelles fabrications. En particulier, on s'intéresse à la récupération des fibres, de plus forte valeur ajoutée que les résines thermodurcissables (prix de la fibre de verre 3€/kg ; prix de la fibre de carbone : 15 à 20€/kg)
De tels procédés existent : ce sont la solvolyse et la pyrolyse.

La solvolyse immerge dans un réacteur le composite avec des solvants réactifs, permettant ainsi de décomposer la matrice et de récupérer les fibres. Ce procédé reste au stade du laboratoire et sa faisabilité industrielle et économique n'a pas pu être prouvée.
La pyrolyse permet de rompre les liaisons entre les fibres et la matrice par chauffage à haute température dans une chambre de traitement. Ce traitement dégrade fortement les propriétés mécaniques des fibres de verre, les rendant impropres à une réutilisation similaire aux fibres vierges. Par contre, il est adapté à la récupération de fibres de carbone, qui gardent des caractéristiques mécaniques quasi-identiques aux fibres vierges. Le procédé est en plus très énergivore. Son bilan environnemental est donc très critiquable[50]. Pour des raisons technologiques et économiques, il ne peut de toute manière qu'être limité à la récupération de fibres de carbone, dont l'usage est encore limité (mais destiné à croître à terme) dans les pales d'éoliennes.
Le recyclage des fibres ne pouvant être envisagé que pour la fibre de carbone, des synergies sont donc à envisager avec l'aéronautique, principal secteur d'application des composites à base de fibres de carbone. L'entreprise Tarmac Aerospace à Tarbes, dont les actionnaires sont Airbus, Safran et Suez, s'est spécialisée sur le démantèlement des avions en fin de vie et développe des procédés de recyclage adaptés à ce type de matériau (projet RCC piloté par Suez et soutenu par l'Ademe et le PIA).

[48] Le marché français est de 300kt. Les principaux secteurs utilisateurs sont les transports (32%), le BTP (21%) et le secteur électrique-électronique (15%). L'aéronautique, souvent citée, ne représente que 4% du marché en volume, donc moins que l'éolien, mais 18% en valeur (il s'agit de composites à base de fibres de carbone, à haute valeur ajoutée).

[49] Certaines études évaluent le flux global de déchets composites aujourd'hui à 30kt.

[50] Certains spécialistes l'estiment même nettement négatif par rapport à celui de la fabrication de fibre vierge.

Une autre voie, plus rustique, de recyclage matière consiste à broyer l'ensemble du composite et, après plusieurs opérations mécaniques, à obtenir un compound ou broyat, mélange de résine et de fibre très courte aux caractéristiques granulométriques plus ou moins bien maîtrisées. Ce produit peut alors être réintroduit dans une filière de fabrication de produits à base de composites, économisant ainsi de la matière première. Par contre, ses propriétés sont inférieures à la matière vierge, ce qui limite son utilisation aux utilisations les moins exigeantes du composite. Plusieurs expériences concrètes ont été citées : fabrication de barrières routières, de traverses de chemin de fer, de plaques type carrelage de terrasse, de mobilier urbain (jeux pour enfants, abribus…). Aucun de ces cas particuliers n'a débouché sur un marché significatif, ce qui peut s'expliquer par le fait que, pour ces applications peu exigeantes, le composite est en concurrence avec des matériaux classiques (béton, bois, plastique non renforcé) moins chers. Ainsi la société ABVal Composites, qui fabriquait des produits pour le bâtiment en composites recyclés, a été mise en liquidation judiciaire début 2018.
Toutefois, la filière industries pour la construction, dans son contrat stratégique de filière 2018-2022, affiche dans l'axe 2 la volonté d'améliorer le taux de valorisation des matériaux issus du recyclage, et de livrer en 2019 un guide méthodologique pour l'introduction de matériaux réemployés et recyclés. La filière éolienne aurait tout intérêt à se rapprocher de cette initiative pour envisager une ouverture technique et économique des marchés de la construction et des travaux publics aux composites recyclés.

4.5.2 La valorisation énergétique

La réglementation française distingue l'incinération avec valorisation énergétique des déchets non dangereux (déchets ménagers et déchets industriels banals DIB) de celle des déchets dangereux.
La valorisation énergétique des déchets non dangereux se fait pour l'essentiel dans les usines d'incinération qui traitent les ordures ménagères (UIOM), qui brûlent 14,4Mt de déchets par an.
La valorisation énergétique des déchets dangereux se fait au sein d'installations dédiées, qui incinèrent 1Mt/an avec récupération énergétique[51] , ou d'installations industrielles, relevant dans les deux cas, au titre de la nomenclature ICPE de la rubrique 2770 « Traitement thermique de déchets dangereux ou contenant des substances dangereuses ». Les installations industrielles concernées sont quasi-exclusivement des cimenteries, qui ont brûlé 1Mt de déchets en 2017.
Depuis 2016, a été en plus introduite la notion de combustible solide de récupération (CSR).
Le décret n°2016-630 du 19 mai 2016 définit le combustible solide de récupération, transcrit dans le code de l'environnement (article R.541-8-1) comme suit : *« Art. R. 541-8-1. - 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. »*
En complément, une nouvelle rubrique ICPE 2971 a été créée dans la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, 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 »*.

[51] 1,4Mt sont par ailleurs éliminés par incinération sans récupération d'énergie.

Le composite issu d'une pale d'éolienne broyée a un pouvoir calorifique de 15 000 à 25 000Kj/kg, ce qui le rend apte à la valorisation énergétique dans l'une des quatre types d'installations mentionnées ci-dessus. Il peut par ailleurs être qualifié de CSR selon la définition ci-dessus dès lors qu'il correspond au cahier des charges de l'installation 2971.

Le déchet de pale d'éolienne n'étant a priori pas classé comme déchet dangereux, il pourrait être traité comme déchet industriel banal (DIB) dans une usine d'incinération. Cette solution présente cependant deux limites. Tout d'abord, une limite quantitative : un chantier de démantèlement produira localement et instantanément en 24h à 48h une quantité relativement importante de déchets à éliminer rapidement, pour lesquels la disponibilité d'une usine d'incinération voisine n'est pas garantie. Ensuite, une éventuelle limite qualitative : le gestionnaire d'usine d'incinération, jusque-là peu habitué à traiter ce type de déchets, pourrait arguer des contraintes de son cahier des charges pour le refuser (cf. en particulier la présence de PVC, susceptible d'émettre du chlore à la combustion). L'incinération dans une installation dédiée de traitement de déchets dangereux serait possible techniquement (qui peut le plus peut le moins), mais prohibitive économiquement : le coût de traitement dans ce type d'installation est de plusieurs centaines d'euros à 1500 €/t[52].
Il reste donc la possibilité de valoriser ce déchet composite comme CSR, soit dans une unité relevant de la rubrique 2971, soit dans les cimenteries.

<u>Les perspectives de combustible de récupération (CSR) à partir de pales d'éoliennes</u>

Les évaluations faites en 2015 lors du vote de la loi sur la transition énergétique et la croissance verte fixaient un objectif de 2,5Mt de CSR en 2025, dont 1Mt destinés à l'industrie cimentière et 1,5Mt pour les autres installations industrielles. A fin 2018, 300kt de CSR sont consommées en cimenteries, et il existe une usine en Mayenne pour alimenter un réseau de chaleur.

En effet, la filière CSR se heurte à un défaut de compétitivité relevant de deux aspects : l'absence d'homogénéité du produit, peu compatible avec le fonctionnement d'une chaufferie industrielle, et la nécessité d'investissements pour adapter le fonctionnement d'une installation de combustion classique à ce type de combustible (ce deuxième handicap n'existe pas pour les fours de cimenteries, déjà équipés pour traiter tout type de déchets à très haute température). Cette situation est aggravée dans le contexte actuel de très bas prix du gaz.
L'Ademe a, en 2016 et 2017, lancé deux appels à projets pour soutenir ce type d'investissements. Trois projets-lauréats sont susceptibles de déboucher à court ou moyen terme : la papeterie Blue Paper (ex-Stracel) à Strasbourg (30 000t de refus de papier recyclé) inauguré dans les mois qui viennent ; celui d'Ileva à la Réunion (où il y a peu d'éoliennes à démanteler) ; et celui de la Compagnie parisienne de chauffage urbain (144 000t de CSR).
Les sources d'approvisionnement de ces projets sont prédéfinies a priori et ne laissent pas, ou très peu, de place à un éventuel CSR à base de composites.

Les cimentiers cherchent à substituer l'énergie fossile classique (fuel, gaz, charbon) utilisée dans leurs fours par des déchets combustibles apportant de la chaleur de combustion (pouvoir calorifique inférieur PCI). Ils visent ainsi à économiser du combustible, l'équation économique étant aussi

[52] Contre 100 à 120€/t dans une UIOM.

susceptible d'être améliorée en fonction du CO2 émis[53]. Globalement, le taux de substitution d'énergie fossile par des combustibles déchets dans les cimenteries est passé de 25% à 44% en dix ans[54]. Certaines usines françaises sont bien au-delà de 50%, objectif que l'industrie cimentière s'est donnée à 2025. Le tableau ci-dessous précise les PCI de divers combustibles susceptibles d'alimenter un four de cimenterie :

Type de combustible	PCI (en Kj/kg)
Fossiles	
- Fuel lourd	40 000
- Gaz	50 000
- Charbon	15 000 à 27 000
Bois et déchets de bois	13 000 à 18 000[55]
Déchets	
- Solvants	40 000 à 45 000
- Huiles usagées	35 000
- Pneus	27 000
- Farines animales	18 500
- Plastique	23 000 à 30 000
- Composites issus d'éoliennes	15 000

Titre : PCI selon les types de combustibles

On voit donc que, dans l'ordre de mérite des différents combustibles susceptibles d'être brûlés en cimenteries, les composites issus d'éoliennes ne sont pas les mieux placés du point de vue calorifique, y compris au sein de la famille des déchets.

Les composites ne sont cependant pas sans avantage comparatif, même par rapport aux plastiques non renforcés. Tout d'abord, ils représentent une ressource facilement identifiée et collectée, plus propre que la masse de plastiques issus de sources disséminées (emballages et autres) et nécessitant des opérations de tri et de nettoyage préalable. Cette homogénéité est, on l'a vu, recherchée par les exploitants des chaufferies et installations de combustion.
Leur taux élevé de charge en fibres de verre peut également constituer un avantage, la silice étant l'un des éléments constitutifs du clinker[56]. Mais on a pu également observer qu'une partie de ces fibres, entraînées dans les fumées, pouvait perturber le fonctionnement des systèmes de filtration. Au final, la charge de silice n'apparaît pas comme un élément décisif d'acceptation du CSR par les cimentiers.

Des entreprises du secteur du recyclage ont donc mis en place des unités de fabrication de CSR. C'est le cas des sociétés membres de Praxy (cf. §4.2), qui ont dix implantations de ce type, produisant en cumulé 175kt/an à destination exclusive de l'industrie cimentière (pour une capacité installée de

[53] L'industrie cimentière est soumise au système européen des quotas de CO2. Une moindre émission de CO2 constitue donc un gain, fonction du prix de la tonne de CO2 (30€/t à ce jour).

[54] Source DGE

[55] Selon l'humidité.

[56] Les fibres de verre de pales d'éoliennes sont dans certains cas traitées au bore, ce qui est a contrario un facteur défavorable

250kt/an). Dans ces unités, le CSR est préparé par mélange et homogénéisation de déchets issus de plusieurs sources (exemple : pales d'éoliennes, résidus de broyage automobile RBA, etc…) afin d'obtenir un produit final de PCI de l'ordre de 20 000 Kj/kg, voire plus. Un tel produit a, pour le recycleur, un coût estimé entre 100 et 150€/t : la moitié correspondant au coût de « fabrication », l'autre au coût d'élimination facturé par la cimenterie. Plusieurs pales d'éoliennes démantelées en Bretagne ont suivi ce processus.

Cette voie, qui est aussi celle qu'ont prise les allemands (cf §4.5.3 ci-dessous), semble être 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. Pour autant, les capacités d'absorption de ces déchets en cimenteries apparaissent incertaines à terme, du fait de la concurrence d'autres matières qui va s'intensifier avec la réduction des possibilités d'enfouissement ; il faut s'attendre a minima à un renchérissement des coûts facturés ci-dessus.

4.5.3 La mise en décharge

Les décharges (ou centres d'enfouissement technique CET) ne sont autorisées depuis 2002 qu'à recevoir des déchets ultimes, définis comme *« résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par la réduction de son caractère polluant ou dangereux »*. D'une manière générale, on observe selon FEDEREC une saturation des CET et une augmentation du coût d'enfouissement

En France, la majorité des déchets composites est encore considérée à ce titre comme déchets ultimes et donc mise en décharge. Le coût de mise en décharge varie de 100 à 160€/t, les déchets composites étant considérés comme des déchets industriels banals (DIB). Ce montant inclut une taxe, dite taxe générale sur les activités polluantes (TGAP), de 41€/t (montant 2019)[57], dont est exemptée la valorisation énergétique. La LFI 2019 a prévu une nette augmentation de la TGAP à partir de 2021.
L'Allemagne interdit la mise en décharge de tout déchet comportant plus de 5% de matière organique, ce qui est le cas des déchets composites. Ceux-ci sont donc massivement orientés vers les filières de valorisation énergétique[58].

4.6 Les terres rares

Certains types d'éoliennes comportent des génératrices[59] synchrones à aimants permanents à terres rares[60].
Il s'agit pour l'essentiel d'éoliennes de grandes puissances. En France, pour l'éolien terrestre, seul le modèle Vestas V-112 est aujourd'hui présent avec cette technologie, et seulement 3% (en nombre) du

[57] Ramenée à 25€/t pour les CET récupérant le biogaz ;

[58] En supposant qu'ils ne soient pas exportés, notamment en Europe centrale et de l'Est.

[59] Dont la fonction est de transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

[60] Les terres rares sont des métaux de la famille des lanthanides, avant-dernière ligne du tableau de Mendeleïev, des numéros atomiques 57 à 71.

parc installé comporte des aimants permanents. Par contre, les futures éoliennes en mer – hors du champ des travaux de la mission- en seront largement équipées.
A ce jour, il n'y a pas eu en France de démantèlement impliquant des éoliennes avec aimant permanent.

Les aimants permanents à terres rares utilisés dans les éoliennes sont des aimants néodyme-fer-bore dits aimants NdFeBo, composés de 69% de fer, 1% de bore et 30% de terres rares (dont 70% de néodyme, 24% de praséodyme, 5% de dysprosium et 1% de terbium).
Ils sont utilisés à 61% dans les appareils électriques et électroniques (disques durs, haut-parleurs), à 15% dans les éoliennes, à 14% dans les véhicules électriques et à 10% dans les scanners à résonance magnétique. Sur les dix dernières années, les quantités utilisées dans les éoliennes et les véhicules électriques sont en augmentation par rapport à celles utilisées en électronique (remplacement des disques durs par les mémoires flash)[61].

Une certaine inquiétude s'est manifestée ces dernières années sur la vulnérabilité des secteurs utilisateurs. En effet, la production d'aimants NdFeBo se concentre dans deux pays, la Chine (85% du total) et le Japon (15%)[62]. De plus, la Chine fournit aussi l'essentiel des matières premières (87% pour le néodyme ; 97% pour le dysprosium).

Les fabricants d'éoliennes cherchent à s'affranchir de cette dépendance en utilisant des aimants permanents à plus faible teneur en terre rare (réduction d'un quart de la quantité de dysprosium), voire en développant des prototypes de génératrice synchrone sans aimants à terres rares (ils sont remplacés par des aimants à ferrite)[63].

Concernant 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 0,55t de dysprosium[64].
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.

La voie la plus simple de recyclage serait la « réutilisation directe » des aimants, après reconfiguration et régénération de l'alliage, pour des usages similaires ou voisins. Deux sociétés en Europe pourraient être présentes sur cette activité : Vacuumschmeltze en Allemagne (le fabricant européen d'aimants NdFeBo) et Silmet en Estonie (filiale du groupe américain Neo Performance Mâterials ex-Molycorp). Elle nécessiterait, pour être rentable, la collecte organisée d'une grande quantité d'aimants de grande taille (hors matériel électronique, donc) à l'échelle européenne. D'autres voies font l'objet de travaux de R&D (voir §5).

[61] Source : rapport de l'Alliance Ancre « Ressources minérales et énergie », juin 2015

[62] Une partie de la fabrication en Chine se fait sous licence Hitachi. La production en Europe, en Allemagne, est marginale (moins de 1%). En France, Ugimag, filiale de Péchiney dans l'Isère, s'était lancée dans cette activité dans les années 1990, avant d'être liquidée au début des années 2000.

[63] Dans l'automobile, la Zoé électrique fonctionne également sans aimant à terre rare (rotor bobiné).

[64] Mais ces chiffres seront multipliés à terme par 40 pour les éoliennes offshore.

5 RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT SUR LE RECYCLAGE DES PALES ET DES AIMANTS PERMANENTS DES EOLIENNES

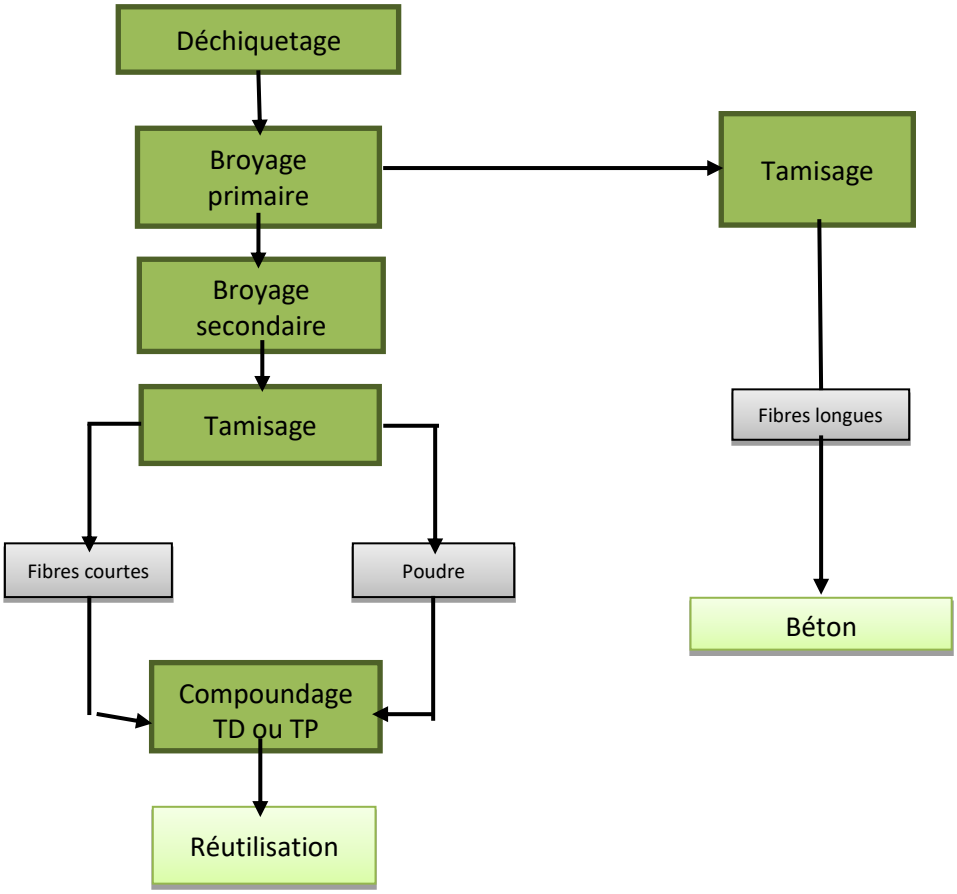
5.1 Les pales d'éoliennes

Plusieurs types de procédés de recyclage des composites sont envisagés, en dehors de la valorisation énergétique dans un incinérateur ou dans une cimenterie (qui valorise aussi la fibre de verre dans le clinker) : mécaniques, pyrolyse ou thermolyse, solvolyse, courant électrique pulsé.

Dans le cas des composites en fibres carbone, c'est la valorisation de la fibre de carbone qui est recherchée, en raison de la valeur du matériau (environ 20€/tonne). Dans le cas de composites en fibres de verre, il est plus difficile d'identifier des modèles économiques viables en raison de la faible valeur de la résine et de la fibre recyclée (2€/tonne).

5.1.1 Procédés mécaniques : broyage et réincorporation

Le composite est déchiqueté, puis broyé avec des granulométries plus ou moins fines. Les particules sont ensuite mélangées, pour fabriquer des produits innovants, moins sollicités mécaniquement que les composites d'origine.



Source : Guide de recyclage des composites, CRECOF, mars 2017, guide financé par l'ADEME et Innovation – plasturgie – composite.

Le projet ABVAL composites (montant total 3,3 M€, 2013-2017), financé par le Programme d'investissement d'avenir, a cherché à finaliser un procédé de recyclage de composite polyester – fibre de verre, et à mettre au point des produits innovants[65] 100 % recyclés et 100 % recyclables. La société ABVAL qui a été constituée à l'issue de ce projet, a été liquidée en mars 2018, faute de débouchés suffisants, et en raison d'un gisement de composites trop faible, ce qui met fortement en doute le modèle économique sous-jacent.

D'autres projets similaires se développent à l'étranger : *Washington State University* et Global Fiberglass Solutions se sont associés pour fabriquer selon un procédé analogue des carrelages et des barrières de route[66]. La société Lankhorst Mouldings commercialise des traverses de chemin de fer en plastiques recyclés. Le Genwind innovation consortium danois cherche à démontrer qu'il est possible de réutiliser des déchets de pales d'éoliennes notamment pour fabriquer des meubles, des composants de construction, etc…Le projet européen Lifebrio, mené par Iberdrola Ingenieria y construccion s'est concentré sur la récupération mécanique des pales d'éoliennes, et leur recyclage comme matières premières secondaires dans le secteur de la construction et du bâtiment. Un autre projet européen React (*reuse of glass fiber reinforced plastics by selective shredding and reactivating the recyclate*), lancé par KEMA Nederland BV, cherche à améliorer le potentiel des déchets composites recyclés dans diverses applications.

5.1.2 Pyrolyse et thermolyse

a) Le composite est porté à haute température (de 450 à 750 °C) pour dégrader la résine, et la séparer des fibres. Selon les conditions (pression et température) des procédés, la phase organique produit des résidus solides ou gazeux qui peuvent être utilisés comme combustibles. Eventuellement, un procédé par lit fluidisé permet le chauffage rapide du composite, dans des conditions oxydantes (par exemple par de l'air chaud) ; une seconde chambre de combustion permet la dégradation complète de la résine et la récupération des fibres de verre ou de carbone.

Les fibres de verre qui sont récupérées ont des propriétés mécaniques fortement dégradées, alors que les fibres de carbone ont des propriétés quasi inchangées, ce qui justifie que ce procédé ait été développé quasi exclusivement pour les composites en fibres de carbone.

L'entreprise danoise Redfiber, créée en 2004, s'est spécialisée dans le recyclage de pales d'éoliennes : elle sépare par pyrolyse les fibres et les gaz issus de la matrice organique qui sont brûlés dans des usines dédiées au chauffage urbain. Les fibres de verre peuvent être utilisées pour la laine d'isolation, des objets en plastique, du béton haute résistance…. D'autres entreprises se concentrent sur la récupération des fibres de carbone : ELG Carbon Fibre (Grande-Bretagne), CFK Valley Stade Recycling GmbH (Allemagne), Karborek (Italie).

b) Une technologie analogue est la vapothermolyse, thermolyse par vapeur d'eau avec un catalyseur, développée notamment par Alpha Recyclage Composite en 2018, pour les composites en fibres de carbone, en partenariat avec Safran, et STS Groupe, et soutenu par un programme Bpifrance et DGA. L'ADEME finance aussi une thèse à l'IMT Mines Albi sur la vapothermolyse des composites à fibres de carbone.

[65] Dalles de terrasse et plaques de soubassement pour clôtures.

[66] Wipag en Allemagne et Reprocover en Belgique ont des activités similaires.

c) Le projet européen H2020 « *recycling of glass fiber reinforced plastic with microwaves pyrolysis* » montre que les fibres de verre, issues de pales d'éoliennes pyrolysées par micro-ondes, perdent seulement 25 % de leur ténacité : en utilisant 25 % de fibres recyclées avec des fibres neuves, les propriétés mécaniques de l'ensemble sont relativement bonnes. Ce procédé par micro-onde a été aussi étudié par l'université de Nottingham, et la compagnie américaine Eltron Research.

5.1.3 Solvolyse

Le composite est introduit dans un réacteur avec un solvant à environ 450 °C ; les fibres sont ainsi séparées de la fraction organique (résine décomposée). C'était l'objet du projet terminé PARCCA, dont les partenaires étaient l'IRT Jules Verne, ICAM Nantes, Airbus, Veolia environnement, OMEGA Systemes, LTN, SACMO ; au moins 50 % des fibres de carbone peuvent être recyclés par ce procédé, maintenant à l'échelle pilote.

5.1.4 Courant électrique pulsé

Le projet ADEME « recyclage de déchets composites plastiques à fibres de carbone par l'utilisation d'une technologie à puissance pulsée » (RCC, 2016-2020, montant total 6,46 M€), financé par le programme d'investissement d'avenir, Suez, et Xcrusher a pour objectif d'industrialiser une méthode de séparation originale des fibres de la matrice par un courant électrique pulsé.

5.1.5 Résines plus facilement recyclables

Plusieurs projets en Europe cherchent à utiliser de nouvelles résines, notamment thermoplastiques, pour remplacer les résines thermodurcissables dans les pales d'éoliennes ; ces dernières n'arriveront en fin de vie que dans une trentaine d'années.

a) La société Arkema promeut la résine Elium, à base de méthacrylate de méthyl, qui polymérise à température ambiante ; celle-ci a des propriétés mécaniques performantes (résistance aux chocs), est soudable, thermoformable, et recyclable.

Le projet Effiwind, financé par l'ADEME, le Conseil régional d'Aquitaine, le Groupe Arkema et d'autres partenaires (2014-2019) a permis de fabriquer une première génération de pales avec une résine thermodurcissable époxy avec une proportion élevée de fibres de carbone. Une 2ème génération de pales a été ensuite fabriquée avec la résine Elium (27 % de résine, 60 % de fibres de verre, 4 % de fibres de carbone) : deux pales de 25 mètres sont en cours de test. Arkema est en attente de la certification[67] de ce type de pale, et espère qu'une éolienne, dotée de telles pales pourra fonctionner début 2020 en Bretagne. Plus de 30 brevets ont été déposés. En cas de développement, la résine Elium sera fabriquée au plus près des fabricants de pales c'est-à-dire en Allemagne, Danemark, Espagne. Une usine de recyclage de pales thermoplastiques pourrait être développée en France, dans 30 ans environ, si le procédé se développe.

[67] Auprès de DNV GL., une société internationale d'enregistrement et de classification accréditée dont le siège est situé à Høvik, en Norvège.

La résine Elium peut être recyclée, après broyage soit par voie mécanique (compression à chaud, ou moulage par injection), soit par voie chimique de dépolymérisation à 200 °C ou 300 °C, qui permet de séparer les monomères recyclables, et les fibres. La technologie Thermosaic CETIM-CERMÂT propose un procédé thermo- mécanique de régénération des déchets composites thermoplastiques, validé à une échelle préindustrielle.

b) Le projet européen H2020 Spire vise à développer une première unité prototype avec base de PMMA (polyméthacrylate de méthyle), et le projet européen H2022 Walid (5,5 M€, 2013-2017) cherche aussi à mettre au point des pales en composites thermoplastiques.

Le projet Dreamwind de Vestas (*Designing recyclable Advanced Materials for wind energy*) essaye plus généralement de mettre au point des matériaux composites recyclables pour les pales, en partenariat avec Aarhus University, et Danish Technological Institute (26,8 M DKK).

c) D'autres solutions font l'objet des recherches, sans doute plus prospectives, comme l'utilisation de matériaux biocomposites (projet ANR Colibio), ou de matériaux vitrimères (projet ANR Matvit).

5.1.6 Conclusion sur les innovations pour le recyclage des pales d'éoliennes

Pour les composites en fibres de verre, dont sont essentiellement composées les pales d'éoliennes terrestres actuellement en fonctionnement, la voie la plus prometteuse est la voie mécanique. L'échec du projet ABVAL montre que les projets industriels ne pourront être viables économiquement que si une action déterminée permettait d'ouvrir des débouchés aux composites recyclés à base de fibres de verre.

Pour les futures pales d'éoliennes, la voie des résines thermoplastiques semble prometteuse, et Arkema a acquis une position de leadership, même s'il existe en Europe des projets analogues. Il reste à Arkema à obtenir la certification nécessaire, à démontrer la possibilité de fabriquer des éoliennes fiables avec ce matériau en testant et validant un prototype (à partir de début 2020 selon Arkema), et enfin à convaincre les fabricants de pales. Peu ou pas d'emplois sont attendus en France, sauf peut-être dans 30 ans quand il s'agira de recycler les pales d'éoliennes en thermoplastique.

5.2 Les aimants permanents

Trois voies de recyclage sont envisagées pour les aimants permanents[68] issus des éoliennes, des véhicules électriques, et des équipements électriques et électroniques (voir note du CEA Tech fournie à la mission en annexe 5) :

-la réutilisation directe
-la régénération de l'alliage et la séparation métallique (pyrométallurgie)
-la séparation des terres rares par voie chimique (hydrométallurgie)

Des travaux importants sont menés par ailleurs pour remplacer les terres rares dans les aimants permanents ou en réduire la teneur.

[68] La demande est en forte croissance (plus de 20% par an selon le CEA)

5.2.1 Réutilisation directe d'aimants usagés

Le reconditionnement d'aimants usagés peut être économique à moyen terme (2025), notamment pour les aimants de grandes dimensions (15 cm x 5 cm x 1 cm), ce que sont les aimants des aérogénératrices des éoliennes[69]. Ceci suppose : (1) la mise en place d'un cadre européen de collecte et de recyclage des aimants, pour disposer des quantités nécessaires, (2) des procédés de retraitement adaptés (usinage économe en matières[70], protection contre l'oxydation).

Fraunhofer IPA a défini des moyens technologiques (dépôts électrolytiques) nécessaires pour assurer une telle protection contre l'oxydation. D'autres méthodes existent notamment à base de résines époxy.

Il existe un savoir-faire industriel en Europe dans ce domaine (Silmet en Estonie, Vaccumschmelze en Allemagne[71]).

5.2.2 Régénération de l'alliage

Plusieurs procédés concurrents font l'objet d'investigations :

- la fusion des aimants usagés pour produire de nouveaux aimants grâce à l'addition de nouveaux ajouts de matière (CEA Tech Liten),
- la fabrication d'une poudre magnétique utilisable dans les procédés actuels de fabrication des aimants, par décrépitation sous hydrogène à basse température du ruban qui sort du bain de fusion, puis rebroyage pour obtenir des grains de 5µm (procédé CEA Tech Liten),
- le retraitement chimique par décrépitation sous hydrogène haute température pour donner à cette poudre issue des aimants usagés des propriétés magnétiques particulières (procédé HDDR du Fraunhofer IWKS).

La poudre produite par l'un ou l'autre des deux derniers procédés ci-dessus est mise en forme par injection, frittage ou éventuellement par fabrication additive.

5.2.3 Extraction chimique des terres rares (hydrométallurgie)

Un procédé hydro métallurgique typique est composé des opérations suivantes :

-lixiviation ou dissolution : mise en solution des différents métaux ;
-purification : séparation des différents métaux/constituants entre eux ;
-électrolyse : récupération du métal voulu sous forme métallique.

Plusieurs voies de lixiviation des aimants permanents et de mise en solution des terres rares sont investiguées, par exemple :

- en solutions acides conventionnelles (CEA Tech Liten, projet ANR Reputer),
- à partir de chlore gazeux en température, de 280°C à 400 °C (BASF),
- en solutions au sein d'une matrice de Magnésium liquide à haute température (CEA Tech Liten).

---

[69] Market study about the recycling economics of rare earth magnets CEA, November 27th 2018.

[70] 20 à 30% de la matière première serait perdue dans les usines lors de la découpe des aimants.

[71] Selon l'Ademe, ce sont les seules entreprises européennes qui commercialisent des aimants recyclés : Le Coldic Paul « la transition énergétique dans l'impasse des terres rares », Mémoire de recherche, Kedge Business school, p 50

D'autres voies de traitement (électro réduction, bio-hydrométallurgie) ont été également mises en œuvre (Fraunhofer IPA) avec moins de succès.

En ce qui concerne la purification, le projet Cyter (CEA Saclay, Université Paris Sud avec le soutien de l'ANR, en partenariat avec Solvay et Eramet) étudie un procédé d'extraction liquide-solide, en alternative aux procédés plus classiques d'extraction liquide-liquide. Une start-up Ajelis, issue de ce projet, a été lauréate du Concours mondial de l'innovation.

5.2.4 Substitution ou réduction des terres rares dans les aimants permanents

Selon le CEA Tech, des efforts de R & D plus importants sont déployés dans le monde pour trouver des substituts aux terres rares que pour promouvoir leur recyclage[72]. Même si ces travaux sortent du cadre de la présente mission, cette tendance peut affecter l'intérêt industriel à long terme de chercher à réutiliser les aimants permanents contenant des terres rares ou à extraire les terres rares des aimants permanents.

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 Tech travaille sur un procédé de mélange de poudres métalliques et de frittage favorisant la diffusion du dysprosium pour la production d'aimants épais. Le projet H2020 Novamac porte sur le développement de nouvelles compositions d'aimants sans ou à terres rares réduites. GreenSpur Renewables a mis au point une génératrice synchrone à aimants permanents en remplaçant les terres rares par de la ferrite.

Enfin, des travaux portent sur une économie de matière dans la mise en forme des aimants permanents, par exemple par le biais de la fabrication additive (CEA Tech Liten).

5.2.5 Conclusion partielle sur le recyclage des aimants permanents

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 (hydrométallurgie) 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.

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[73].

---

[72] Market study about the recycling economics of rare earth magnets CEA, November 27th 2018.

[73] Contrairement à d'autres produits contenant des terres rares comme les ampoules fluorescentes, et les batteries NiMH, les aimants à base de terres rares sont peu collectés en tant que tels.

6 CONCLUSION ET PROPOSITIONS DE LA MISSION

A l'issue de cette analyse, la mission formule les recommandations suivantes :

1) Adapter la garantie financière du démantèlement.

Le retour d'expérience sur les coûts est limité en France ; en revanche les coûts nets[74] de démolition observés dans d'autres pays montrent des écarts assez importants. Les incertitudes liées au coût d'élimination d'incinération des pales et aux cours des métaux, ainsi qu'à la diversité géographique des sites de parcs, laissent penser que les coûts nets actuellement constatés en situation relativement simple représentent la fourchette basse de l'estimation. En outre il est nécessaire d'inciter à l'éco-conception et à l'optimisation des quantités de matières mises en œuvre par les constructeurs, la production de toutes les matières concernées générant des externalités environnementales (énergie, eau, CO2, biodiversité etc…). Il semble donc justifié d'introduire dans la formule de la garantie financière une composante proportionnelle à la masse à démanteler[75].

Recommandation n° 1.	Ajouter à la part fixe actuelle de la garantie financière de 50K€/éolienne une part variable proportionnelle notamment à la masse de l'éolienne (éoliennes nouvelles et actuelles, fixation par arrêté).

2) Responsabiliser les fabricants et détenteurs de pales

Le recyclage des pales se heurte à des verrous technologiques, économiques et de marché: la première génération de pales ne pourra être éliminée, si on veut éviter la généralisation de l'enfouissement, que par incinération avec valorisation énergétique, dans des conditions financières qui s'annoncent de plus en plus coûteuses. Dans un premier temps, il est nécessaire de responsabiliser les fabricants de pales sur les déchets d'aujourd'hui, coûteux à démonter, transporter et éliminer à défaut de pouvoir les valoriser. Pour que cette valorisation soit possible dans un deuxième temps, le recyclage doit désormais figurer au cahier des charges de ces produits, au même titre que les performances techniques, si on souhaite favoriser la recyclabilité des éoliennes, à laquelle ces composants sont un des obstacles majeurs (cf. recommandation suivante). L'obligation faite aux fabricants de pales ou d'éoliennes et aux détenteurs (exploitants de parcs) peut être inspirée du modèle de la filière Véhicules Hors d'Usage[76]. Par transposition de ce modèle à la filière éolienne, un réseau d'opérateurs qualifiés serait créé pour optimiser les opérations de démontage, collecte, transport et traitement du gisement des pales. Les acteurs seraient mobilisés pour rechercher des solutions économiquement viables de recyclage des résines thermodurcissables, ou de solutions alternatives à base de résines thermoplastiques. Les industriels auraient aussi des obligations en termes d'informations techniques et économiques, et de concertation avec les pouvoirs publics. En rapprochant les acteurs de l'éolien de ceux du recyclage et en particulier du recyclage des composites, cette filière REP (sans redevance

[74] Après prise en compte des recettes générées par la vente des matériaux métalliques, notamment.

[75] Une formule est proposée en note de bas de page §4.2

[76] Automobiles Rapport annuel de l'Observatoire des VHU données 2016 ADEME

ni éco-organisme) pourrait contribuer à l'internalisation des coûts. Selon l'OFATE[77], bien que les pales ne correspondent qu'à 3% de la masse des éoliennes, leur fabrication représente un quart des coûts.

Recommandation n° 2.	Introduire une obligation de responsabilité élargie du producteur (REP) pour les pales sur le modèle de la REP véhicules hors d'usage (REP-VHU), dans un premier temps sans éco-organisme ni éco-contributions associés pour les éoliennes actuelles et futures (texte législatif).

3) Introduire des critères de choix, relevant de l'économie circulaire, pour les appels d'offres lancés par la CRE sur les installations éoliennes soumises à autorisation et une obligation d'analyse de cycle de vie.

L'absence de critère de durabilité dans la réglementation communautaire et nationale nuit à la filière éolienne, dont les effets sur l'environnement (consommations de matières premières et d'énergie, émissions CO2 in situ et empreinte carbone dans les pays d'origine des matières premières et des composants, etc.), sont régulièrement questionnés. D'autres énergies renouvelables comme la biomasse solide et les biocarburants sont assorties de critères de durabilité dès la directive REDII. Même si la prise en compte de nombreux impacts environnementaux est assurée par la procédure de l'autorisation unique, la mise en place de solutions éco-conçues, et de filières complètes de recyclage et de réutilisation des matériaux et équipements issus du démantèlement des installations éoliennes[78] semble une condition nécessaire pour améliorer et faire valoir le caractère durable de leur développement.
La mission propose d'introduire dans les appels d'offres CRE deux critères de notation objectifs, en sus du prix, permettant de valoriser l'utilisation par les candidats d'équipements éco-conçus pour économiser les matières premières, et l'utilisation pour les pales de matériaux recyclables.

<u>Critère 1 : L'efficacité massique de l'éolienne en t/MW hors fondations</u> afin de susciter de l'éco-conception (voir tableau § 4.1).

<u>Critère 2 : Un bonus de notation fondé sur la recyclabilité des matières utilisées pour les pales.</u>
Le barème pourrait porter sur les résines utilisées pour les pales, sur base de données de recyclage fournies par les exploitants. Les matières recyclables se verraient octroyer un bonus.

Par ailleurs, l'éloignement géographique des étapes les plus en amont de la fabrication de ces produits contribue à rendre invisibles les externalités environnementales associées à cette fabrication et favorise l'idée d'énergies renouvelables « zéro émission ». La non prise en compte de ces externalités peut de ce fait questionner la pertinence environnementale de ces infrastructures et technologies. L'appréciation mesurable du caractère « durable » des technologies de la transition énergétique sur l'ensemble de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui les composent, jusqu'à leur démantèlement et recyclage, en mettant en regard leurs performances énergétique et environnementale (empreinte carbone, en tonnes de CO2 équivalent, ou intensité matière première,

[77] OFATE Démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne, Février 2019.

[78] et, plus généralement, de l'ensemble des technologies de production d'électricité à partir de sources renouvelables.

en tonnes de béton, acier, cuivre ou métaux rares, consommation d'eau, polluants divers etc.), par quantité d'énergie produite, permettrait de disposer de données opposables pour évaluer entre elles les solutions éoliennes et induirait des comportements de progrès continu des constructeurs permettant de faire baisser leur empreinte. L'idéal serait d'introduire à terme une méthodologie d'ACV opposable dans la normalisation européenne (EN 61400-01 ou autre), afin de disposer d'un cadre européen de durabilité. Cette recommandation ne devrait pas rencontrer de difficulté, dans la mesure où les ACV réalisées montrent des performances intéressantes, et où certains constructeurs produisent déjà des ACV de leurs modèles. Elle aurait l'avantage de fournir un cadre méthodologique unique pour ces ACV et de faire émerger des données propres au parc français. Elle permettrait ensuite de fixer des critères de notation objectifs liés aux différents indicateurs mesurés, prenant en compte les externalités des quantités de matières mise en œuvre et des process utilisés.

Recommandation n° 3.	Imposer deux nouveaux critères objectifs d'économie circulaire (efficacité massique et bonus de recyclabilité) et une obligation d'ACV dans les appels d'offres lancés par la CRE pour les installations futures soumises à autorisation.

4) Evaluer au cas par cas un parc hétérogène face aux enjeux de la durée de vie.

A l'arrivée à échéance des contrats d'achat (15 ans pour les contrats signés avant 2016), les producteurs peuvent avoir un intérêt économique à démanteler l'installation, et quand ils le peuvent, à la remplacer par une installation plus récente, produisant jusqu'à 3 ou 4 fois plus d'électricité, et candidate à un nouveau contrat de soutien. Selon une estimation du SER, seuls 30% des parcs actuels seraient démantelés à 15 ans[79]. Cette orientation est plutôt conforme aux objectifs de la PPE et s'inscrit dans la transition énergétique, mais anticipe la fin de vie prévue par la norme de construction CEN 61400-01 des éoliennes terrestres, qui prévoit que, en conditions non spécifiques « la durée de vie prévue à la conception… doit être d'au moins 20 ans ».

A contrario, une poursuite de l'exploitation au-delà du contrat d'achat et jusqu'à la fin de la durée de vie de l'installation (20 ans au moins d'après la norme, 25 ans si la maintenance est bien réalisée) permettrait d'optimiser l'utilisation des équipements et de limiter, pour une même production d'énergie, le volume de matériaux devant faire l'objet d'un démantèlement et d'un recyclage, ce qui serait davantage conforme aux prescriptions de la Directive déchets, mais retarderait la production supplémentaire permise par le « repowering ». Le SER estime que 50% des parcs pourraient prolonger leur vie et être démantelés entre 15 et 20 ans et que 20% des parcs pourraient l'être entre 20 et 25 ans[80]

Même si la stratégie industrielle dépend du seul choix de l'exploitant, il existe un arbitrage à faire, en termes de politique publique, entre ces deux finalités. Pour la mission, cet arbitrage doit tenir compte des conditions propres à chaque situation, compte tenu de l'hétérogénéité du parc concerné,

[79] La part repowerée n'a pas été estimée

essentiellement constitué entre 2002 et 2013, et de l'impératif de sécurité qui doit s'imposer. L'instruction de 2018 sur le « repowering » semble à cet égard adaptée.

5) Consolider l'information sur la fin de vie des parcs.

Il apparaît souhaitable de disposer d'un répertoire national constitué à partir des informations détenues par les services déconcentrés, pour mieux connaître et évaluer la durée de vie des parcs et les flux de matières issues de leur démantèlement.

Recommandation n° 4.	Faire tenir par exemple par le CGDD 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) Mieux piloter le renouvellement du parc éolien.

La décision pourrait être éclairée par une vision plus précise des conditions géographiques qui vont peser également sur la possibilité ou non de « repowerer ». Pour cela la mise en chantier d'un SIG sur les parcs existants et les zones de vent identifiées, mais aussi sur les obstacles au repowering tels que les sites N 2000, les servitudes aéronautiques ou militaires, ou liées aux télécommunications, pourrait avoir du sens pour guider l'évaluation par les préfets des dossiers qui leur sont soumis. En effet une meilleure implantation des éoliennes permettra d'optimiser la puissance totale produite en France, donc d'avoir moins d'éoliennes pour une valeur donnée de la puissance installée, et donc moins de matières à recycler dans 30 ans.

Recommandation n° 5.	Réaliser une cartographie (SIG) des parcs et des zonages applicables pouvant empêcher ou limiter le « repowering » dans ces parcs (servitudes aéronautiques, liées à la défense, électroniques et autres, zones Natura 2000, etc…).

7) Modifier les exigences de remise en état des sites.

Les conditions actuelles prévues par l'arrêté du 26 août 2011 n'assurent pas une remise en état totale permettant un fonctionnement adéquat de l'écosystème du sol, en conservant des masses importantes inertes et imperméables qui nuisent à son bon fonctionnement biologique et à sa productivité, et en laissant dans le sol des ferrailles dont l'oxydation et l'altération peuvent avoir des effets polluants sur les eaux souterraines et sur le sol. Cette situation apparente le chantier remis en état à un enfouissement, autorisé mais inséré dans des espaces agricoles ou forestiers, dont l'avenir est ainsi compromis. Pour mémoire le démontage total est exigé dans certains länder allemands et préconisé par l'OFATE[81], ainsi qu'aux Pays Bas (cf. réponse au questionnaire) ; il est également systématique lors de l'implantation de nouvelles éoliennes sur le même site, selon le SER. Les cas échéant, il serait possible de faire précéder cette concertation d'un écobilan comparatif entre le

[81] OFATE Démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne, Février 2019 : « Pour préserver l'environnement, il semble qu'un démantèlement intégral, incluant par exemple els fondations, s'avère indispensable. »p. 15

maintien sur place partiel des fondations tel que fixé par la réglementation, et leur excavation totale systématique.

Recommandation n° 6.	Engager une concertation avec les exploitants en vue de modifier les exigences de remise en état en imposant l'excavation complète des massifs d'ancrage (éoliennes nouvelles et actuelles).

8) Développer recherche et innovation pour améliorer le recyclage des pales d'éoliennes, et des aimants usagés

Plusieurs solutions pour le recyclage des composites en fibres de carbone sont au stade pré-industriel : pyrolyse, thermolyse, solvolyse, et courant électrique pulsé permettent de séparer les fibres de carbone et la résine, dont les résidus solides ou gazeux peuvent être valorisés sous forme thermique. Le recyclage des composites en fibres de verre peine à trouver un modèle économique viable, compte-tenu de la faible valeur marchande des fibres de verre recyclées : une méthode possible pour ces dernières est le broyage et la réincorporation des particules de composites dans des produits innovants, notamment dans le domaine de la construction et du bâtiment. Une voie prometteuse pour des résines des pales de demain semble être celle des thermoplastiques, plus facilement recyclables. Les composites en fibres de verre et de carbone usagés peuvent avoir d'autres origines (aéronautique, BTP, automobile, bateaux…) que les pales d'éoliennes, qui ne représentent que 7% du marché français (cf. §4.5). Des recherches permettant l'émergence d'acteurs industriels français du recyclage pour l'ensemble de ces usages sont d'autant plus nécessaires.

Les aimants permanents de la filière éolienne ne représentent aussi qu'une petite part du marché français (15%) : les aimants sont surtout présents dans les appareils électriques et électroniques (cf. § 4.6). L'éolien offshore accroitra significativement cette part de marché. La spécificité, et l'intérêt, des aimants permanents des éoliennes sont leur taille (600 à 1000 kg/MW). Ces aimants contiennent environ 30% de terres rares, considérés comme des métaux critiques, car la Chine en est de très loin le premier producteur. Comme la France ne réalise 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 pour les aimants de demain. La recherche publique française, notamment le CEA, a développé des compétences de niveau international.

Recommandation n° 7.	Pour susciter des acteurs industriels français du recyclage des composites et des terres rares, cibler le financement public (ANR, ADEME, PIA…) pour permettre l'émergence de procédés viables sur le plan économique notamment (1) pour les composites en fibres de verre, les voies mécaniques (2) pour les aimants permanents, la régénération. Pour les composites et les aimants permanents du futur, travailler sur (1) les résines thermoplastiques pour pales (2) la substitution ou la réduction de la teneur de terres rares dans les aimants.

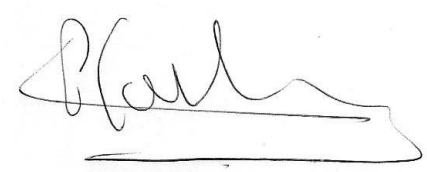
A Paris, le 13 mai 2019

Les membres de la mission

Sylvie Alexandre

Ingénieure générale des ponts, des eaux et des forêts

Philippe Follenfant



Ingénieur général des mines

Benoît Legait

Ingénieur général des mines

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de mission

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Paris, le 14 JAN. 2019

Le ministre d'Etat

à

Madame la vice-Présidente du Conseil général de l'Environnement et du Développement durable

Monsieur le vice-Président du Conseil général de l'Economie, de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies

Référence : MIN_TES/YM/D18019979
Objet : Economie circulaire dans la filière éolienne

Le développement de la filière éolienne représente en France près de 14 GW de puissance installée à fin 2018. Cette puissance installée représente une masse importante de matériaux et d'équipements dont le démantèlement s'inscrit dans des cadres juridiques fixés (responsabilité élargie du producteur, directive DEEE pour le photovoltaïque et obligations légales pour les sociétés attributaires des appels d'offres). Cependant, le caractère durable très souhaitable de ces technologies nécessite des solutions de recyclages qui restent largement à faire émerger ou à renforcer. L'émergence d'une économie circulaire sur ces filières de recyclage, et la capacité à trouver avec d'autres filières existantes des synergies pour optimiser économiquement ces activités revêtent également un enjeu fort de création de nouvelles activités rentables sur le territoire national.

D'ores et déjà le recyclage des pales, en matériaux composites représente un premier défi.

Je vous demande de bien vouloir diligenter une mission pour identifier, pour cette filière les initiatives à prendre en termes de réutilisation et de rénovation de certains dispositifs telles que les turbines ainsi que de recyclage des matières, et équipements issues du démantèlement des installations en fin de vie. Ces enjeux doivent non seulement recouvrir les activités de traitement des matériaux, des équipements de conversion et de stockage mais également les circuits de collecte.

COURRIER ARRIVEE LE

16 JAN. 2019

VP/CGE
N° CGEIET/2019/01/4946

Hôtel de Roquelaure – 246, boulevard Saint-Germain – 75007 Paris – Tél : 33 (0)1 40 81 21 22
www.ecologique-solidaire.gouv.fr

Vous identifierez plus précisément les décisions pertinentes qui relèvent :

- d'enjeux partagés avec d'autres secteurs d'activité et le poids relatif de cette filière par rapport aux filières historiques. Pour les filières existantes, je souhaite que vous puissiez proposer les conditions dans lesquelles les matières et équipements issues des éoliennes peuvent s'insérer dans les flux classiques de recyclage. Pour les filières restant à créer où pour celles pour lesquelles le démantèlement des installations éoliennes représente un flux significatif de matière, je souhaite que vous puissiez analyser les conditions dans lesquelles de nouvelles activités peuvent se créer, et comment la prise en compte de ces enjeux pourra servir l'industrie française ;

- d'enjeux spécifiques à ces filières : je souhaite que vous puissiez en particulier analyser la question de l'accès aux terres rares ou du traitement de métaux spécifiques. Pour ces enjeux spécifiques, je souhaite que vous puissiez identifier les travaux restant à mener techniquement pour permettre un recyclage efficace et pertinent économiquement.

Afin de faire émerger un modèle d'économie circulaire, je vous demande d'échanger avec les acteurs de ces filières sur les enjeux non résolus, les créations de valeur potentielles par le retraitement des matières et équipements des installations démantelées et les points d'attention ou de risques spécifiques de ces activités.

Je souhaite que vous puissiez me faire des propositions d'action à conduire dans le court et le moyen terme pour créer les conditions d'émergence de ces nouvelles activités économiques viables sans apport structurel de financement public ou ni de de taxes spécifiquement nationales. Les leviers utilisés pourront être de toutes natures ; vous porterez une attention particulière sur les critères des appels d'offres prévus par la Programmation pluriannuelle de l'énergie, afin qu'ils garantissent un bon niveau de recyclabilité. Enfin, je souhaite que vous puissiez me proposer les modalités pour assurer un contrôle efficient des activités de collecte et de recyclage y compris aux frontières européennes.

Vous vous appuierez pour réaliser cette mission sur les services du commissariat général au développement durable, de la direction générale de l'énergie et du climat, de la direction générale de la prévention des risques et de l'Ademe. Je souhaite que vous puissiez également confronter les pistes opérationnelles que vous serez amené à identifier avec les principaux opérateurs publics du financement de la transition énergétique, à savoir la caisse des dépôts et consignation, Bpifrance et la banque européenne d'investissement.

Je souhaite pouvoir disposer du rapport de mission avant le 31 mars 2019.

François de RUGY

Annexe 2 : Liste des acronymes utilisés

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AD3R	Association démantèlement recyclage reconditionnement et revente
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AELE	Association européenne de libre-échange
ANR	Agence nationale de la recherche
CET	Centre d'Enfouissement Technique
CRE	Commission de régulation de l'énergie
CRECOF	Comité Recyclage Composites France
CSR	Combustible Solide de Récupération
DGEC	Direction générale de l'Énergie et du Climat
DGPR	Direction générale de la Prévention des risques
DIB	Déchets Industriels Banals
ETI	Entreprise de Taille Intermédiaire
ETP	Equivalent temps plein
FEDEREC	Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage
FEE	France Energie Eolienne
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IOTA	Installations, ouvrages, travaux et activités
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OFATE	Office franco-allemand pour la transition énergétique
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PIA	Programme d'Investissements d'Avenir
RBA	Résidus de Broyage Automobile
RCC	Recyclage de déchets composites plastiques à fibres de carbone
SER	Syndicat des énergies renouvelables
TGAP	Taxe Générale sur les Activités Polluantes
UIOM	Usine d'Incinération des Ordures Ménagères
ZDE	Zone de Développement de l'Eolien

Annexe 3 : Liste des personnes rencontrées ou interrogées

Organismes publics et parapublics

Cabinet du ministre de la Transition écologique et solidaire-
M. Xavier Ploquin, conseiller en charge de l'énergie, de l'industrie et de l'innovation
Michel Gioria, conseiller économie circulaire et finances vertes

DGE
Thomas Pillot, sous-directeur de la chimie, des matériaux et des éco-industries
Sandrine Le Roch, chargée de mission développement durable et réglementation
Valery Lemaitre, adjoint au chef du bureau de l'énergie

DGEC
Stanislas Reizine, sous-directeur des systèmes électriques et des énergies renouvelables
Vincent Delporte, chef du bureau de la production électrique et des énergies renouvelables terrestres

DGPR
Delphine RUEL, sous-directrice des risques accidentels
Vincent COISSARD, sous-directeur déchets et économie circulaire

DGALN
Karine Brulé, sous-directrice de l'eau, des milieux aquatiques et des ressources minérales non énergétiques
Rémi Galin, chef du bureau politique des ressources minérales

CGDD
Pascal Dupuis, chef du service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable
Alain Griot, direction de la recherche et de l'innovation

DREAL Grand Est
Audrey Hamm, coordinatrice des EnR, chargée de mission Éolien

Office franco-allemand de la transition énergétique(OFATE)
Sven Rosner, directeur
Markus Wagenhäuser, chargé de mission éolien

ADEME
Sébastien Billeau
Adeline Pillet
Raphael Gerson

ANR
Olivier Spalla, responsable du Département « Sciences Physiques Ingénierie, Chimie et Energie »
Pascal Bain, Responsable scientifique du Défi 2 (Energie propre, sûre et efficace) et co-responsable du Défi 6 (Mobilité et systèmes urbains durables)

CRE (contribution écrite)
Adrien Thirion, chef du département de soutien aux énergies renouvelables et aux consommateurs

Organisations professionnelles

Syndicat des énergies renouvelables
Marion Lettry, déléguée générale adjointe
Paul Duclos, responsable filière éolienne

France énergie éolienne
Mâtthieu Monnier, responsable du pôle industrie, offshore, techniques et territoires

Federec
Clément Vignot, chargé de mission

Fédération de la plasturgie et des composites
Marc Madec, directeur développement durable
Clément Rieu, directeur des affaires économiques et de la compétitivité

IPC, Innovation, plasturgie, composites
Gilles Dennler, directeur adjoint aux grands programmes
Pascal Francescato, directeur adjoint de la recherche

Union des industries chimiques (UIC)
Claire Dadou-Willmann, directrice « recyclage et économie circulaire », déléguée générale de 2ACR (Association alliance chimie recyclage)

Fédération des industries nautiques
Guillaume Arnauld des Lions, délégué général adjoint

Ligue de protection des oiseaux (LPO)
Geoffroy Marx

Entreprises

Engie
Gwenaelle Avice-Huet, directrice générale adjointe (en charge des énergies renouvelables)

Quadran Direct energie (groupe Total)
Laurent Albuisson directeur recherche

Kallista
Johann Tardy, directeur général

Vestas
Nicolas Wolff, Directeur général Vestas Western Mediterranean et Vestas France

Enercon
Cécile Maisonneuve, directrice business development, administratrice de France énergie éolienne

NetWind
Didier Evano, PDG et président de AD3R (Association démantèlement-recyclage-reconditionnement – revente des éoliennes)

Guyot Environnement
Olivier le Fichous, directeur du développement
Patrick Curaudeau

Praxy
Florent Colon, président
Audrey Fages, directrice commerciale

Suez
Nicolas Bequaert, directeur général recyclage et flux spécialisés
Marc Ferreol, directeur division démantèlement, BL recyclage et flux spécialisés

Véolia
Gilles Carsuzaa, Directeur général - Triade Electronique et Veolia Déconstruction France

Arkéma
Christian Collette, chief technology officer& managing director New Business development
Guillaume Cledat, Elium, Business and development manager

Everose (cabinet-conseil)
Jérôme Jacquemin

Innovsea (cabinet-conseil)
Félix Gérintion,

Alcimed (cabinet-conseil)
Laurence Padilleau

Centres de recherche

CEA Tech Liten

Emmanuelle Rouvière,

Christel Deguet, Head of New Mâterials Technologies Division (DTNM/LITEN/CEA Tech)

Claire Alberti

Annexe 4 : Cadre national du soutien aux parcs éoliens du code de l'énergie

Les parcs mis en service jusqu'au 31.12.2015 ont bénéficié des dispositions antérieures (en France arrêtés tarifaires de 2008 puis de 2014 sans mise en concurrence), ceux installés en 2016 ont connu un régime de transition, et ceux installés à partir de 2017 ont été soumis au nouveau régime de soutien prévu par les lignes directrices.

Les dispositions législatives du code de l'énergie

Le code de l'énergie (article L.311-10) prévoit que « lorsque les capacités de production ne répondent pas aux objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie,…, l'autorité administrative peut recourir à une procédure de mise en concurrence dont les modalités sont définies par décret en Conseil d'Etat » et que « toute personne installée sur le territoire d'un Etat membre de l'Union européenne ou, dans le cadre de l'exécution d'accords internationaux, sur le territoire de tout autre Etat et désirant exploiter une unité de production peut participer à cette procédure de mise en concurrence. ».

Selon l'article L.311-10-1, « la procédure de mise en concurrence est conduite dans le respect des principes de transparence et d'égalité de traitement des candidats », et « pour désigner le ou les candidats retenus, l'autorité administrative se fonde sur le critère du prix, dont la pondération représente plus de la moitié de celle de l'ensemble des critères, ainsi que, le cas échéant, sur d'autres critères objectifs, non discriminatoires et liés à l'objet de la procédure de mise en concurrence, tels que la qualité de l'offre,(y compris la valeur technique, les performances en matière de protection de l'environnement, l'efficacité énergétique et le caractère innovant du projet), la rentabilité du projet, la sécurité d'approvisionnement, et dans une mesure limitée, la part du capital détenue par les habitants résidant à proximité du projet ou par les collectivités territoriales ou leurs groupements sur le territoire ou à proximité du territoire desquels le projet doit être implanté par les sociétés porteuses du projet. Il est précisé que les conditions d'exécution peuvent prendre en compte des considérations à caractère social ou environnemental et poursuivre des objectifs de développement durable conciliant développement économique, protection et mise en valeur de l'environnement et progrès social, mais qu'elles ne peuvent pas avoir d'effet discriminatoire entre les candidats potentiels et doivent être mentionnées dans le cahier des charges.

L'électricité d'origine éolienne produite dans les zones non interconnectées ou dans les zones de développement de l'éolien terrestre bénéficie de l'obligation d'achat par les entreprises de distribution d'électricité (article L.314-1). Les ZDE ont été supprimées entretemps. Enfin L'article L.314-4 du même code prévoit la fixation par voie réglementaire des conditions dans lesquelles les ministres chargés de l'économie et de l'énergie arrêtent, après avis de la Commission de régulation de l'énergie, les conditions d'achat de l'électricité produite.

Partie réglementaire : articles R. 311-1 à 311-47, R. 314-1 à 314-52 et R. 115-101 à 108 du code de l'énergie

Ces articles précisent les modalités de mise en œuvre de la mise en concurrence, de l'obligation d'achat et du complément de rémunération cités ci-dessus et fournissent la base juridique à l'arrêté du 6 mai 2017 pour les parcs de 6 éoliennes au plus, et aux appels d'offres soumis à l'avis de la Commission de régulation de l'énergie (art L. 311-14) pour les parcs supérieurs à 7 éoliennes ou dont une éolienne a une puissance nominale supérieure à 3 MW..

L'arrêté du 6 mai 2017 et les appels d'offre nationaux.

L'arrêté fixe les conditions de complément de rémunération pour les parcs de 6 éoliennes et de 3MW de puissance nominale par éolienne au maximum. Le niveau de tarif dont peuvent bénéficier les installations dans ce cadre est compris pour un premier palier de production entre 74,8 et 76,8 €/ MWh (prime de gestion incluse) selon la taille des rotors, puis plafonné à 40 €/ MWh au-delà de ce palier

Les appels d'offre concernent les parcs éoliens de plus de sept éoliennes ou dont une éolienne a une puissance nominale supérieure à 3 MW. Le dernier appel d'offres est paru en avril 2017 au JOUE (3 GW répartis en 6 tranches de 0,5 GW entre le 1/11/2017 et le 1/06/2020). Le prix moyen pondéré proposé par la CRE est de 66,9 €/ MWh pour 4 lauréats, cinq lauréats ont été retenus pour un prix moyen pondéré de 68,6 €/ MWh.

Les deux textes précisent que seules sont éligibles au complément de rémunération, ou seules peuvent concourir à l'appel d'offre les installations nouvelles, c'est-à-dire dont la demande complète de contrat ou le dépôt de l'offre a été déposée avant le début des travaux, et « dont les principaux éléments constitutifs de l'installation sont neufs » :

- par « début des travaux », on entend soit le début des travaux de construction liés à l'investissement, soit le premier engagement ferme de commande d'équipement ou tout autre engagement rendant l'investissement irréversible, selon l'événement qui se produit en premier. L'achat ou la location de terrains et les préparatifs tels que l'obtention d'autorisations administratives et la réalisation d'études de faisabilité préliminaires ne sont pas considérés comme le début des travaux.
- les éléments constitutifs sont considérés comme neufs lorsqu'ils n'ont jamais servi à la production d'électricité à des fins d'autoconsommation ou dans le cadre d'un contrat commercial. Les principaux éléments constitutifs de l'installation sont les aérogénérateurs, les mâts, les raccordements inter-éoliennes et les systèmes électriques. »

Annexe 5 : Note du CEA Liten transmise à la mission sur le recyclage des aimants permanents

FROM RESEARCH TO INDUSTRY cea tech

NOTE

LIEU-DATE : GRENOBLE, LE 19 MARS 2019

RÉFÉRENCE : CEA/LITEN/DTNM/SA3D/2019-045

ÉMETTEUR : Emmanuelle ROUVIERE

OBJET : RECYCLAGE DES EOLIENNES

DESTINATAIRES : Benoit LEGAIT, Philippe 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[1]. La quantité d'aimants par MW installé dépend du type de turbine, et plus particulièrement de la présence de boites de vitesse pour assurer la démultiplication entre la rotation des pales et la rotation de la génératrice. Dans les configurations sans boite (« direct drive »), la quantité d'aimants est d'environ 600 Kg/MW. La part de ces génératrices devrait s'accroitre 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[2]. 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 croitre avec le déploiement de la filière H_2.
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[3]. 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

[1] C.C. Pavel et al., Substitution strategies for reducing the use of rare eaths in wind turbines, Resources Policy 52 (2017)
[2] Report on critical materials for the EU 2014 - http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_fr
[3] J. Seaman, Rare earths and China: a review of changing criticality in the new economy, otes 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

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[4].

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**[5] : (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**[6].

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[7].

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 $Nd_2Fe_{14}B$. 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

[4] S. Deetman, Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation, Technologies, Cars, and Electronic Appliances, Environ. Sci. Technol. 2018, 52, 4950−4959

[5] K. Binnemans, Recycling of rare earths: a critical review, Journal of Cleaner Production 51 (2013)

[6] R. Schulze, Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material, Resources, Conservation and Recycling 113 (2016)

[7] S. Hope, Toyota's long term-vision on electrified vehicles, DEMETER Symposium, 02/2019

PUBLIÉ

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 où 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.

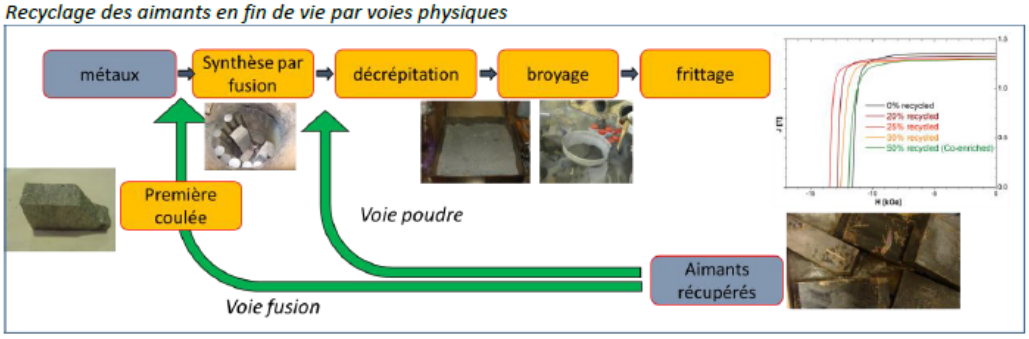
Approche	Technologie	Projet en cours
L'économie de matière	Mise en œuvre de procédés de fabrication sans usinage (fabrication additive)	Partenariat industriel confidentiel
La réduction des TR	Procédé de mélange de poudres métalliques et de frittage favorisant la diffusion du Dy pour la production d'aimant épais	PMLT CEA 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 KIC RM PERMAFROST

5) Le contexte actuel national et européen du recyclage des aimants

PUBLIÉ

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 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.

PUBLIÉ

Annexe 6 : Le recyclage des éoliennes aux Pays-Bas

Service économique de La Haye
Rédacteurs : Tatiana Lehat/ Samira Irsane

Éléments locaux de contexte du pays questionné :

Eléments de contexte – ECI Recyclage Eoliennes (03/2019)

Le gisement éolien néerlandais est l'un des plus importants en Europe et il devrait connaître un développement rapide dans les prochaines années. En effet, d'une part la fin anticipée de l'exploitation du gaz de Groningue, et d'autre part la baisse prévue de la consommation de gaz naturel dans le cadre des objectifs du pays en matière de transition énergétique concurrent au développement de sources d'énergies nouvelles, et en particulier de l'éolien. Toutefois, les Pays-Bas demeurent l'un des plus mauvais élèves de l'UE en terme de production d'énergie renouvelable[82] ; et ce en dépit du développement très rapide de fermes éoliennes *offshore*.

En termes de production, les Pays-Bas ont l'ambition de disposer de la plus grande capacité mondiale d'éolien *offshore* en 2023, avec une capacité de 4,5 GW, qui devrait croître à 11,5 GW à l'horizon 2030. L'objectif du gouvernement est de satisfaire 40% de la consommation électrique nationale grâce aux fermes éoliennes *offshore* en 2030, selon l'accord de transition énergétique de 2017[83]. Cela représente la construction de 5 nouvelles fermes offshore entre 2018 et 2023. De surcroit, le gouvernement a annoncé son intention de lancer la construction de 3 fermes supplémentaires à partir de 2021. Quant à sa capacité *onshore,* elle devrait atteindre 8 GW en 2030. L'énergie éolienne représentait quand même 55% de la production d'énergies renouvelables en 2018, soit 9,3 Mds de kilowattheures[84]. Ces objectifs de production s'inscrivent dans la stratégie contenue dans l'accord national sur l'énergie de 2013, qui vise à porter la part des renouvelables dans la consommation énergétique totale à 16% en 2030. Ainsi, ces ambitions devraient permettre la réduction des émissions de CO_2 à -55% et la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Beaucoup de ces cibles risquent de ne pas être atteintes, notamment sous la contrainte d'une opinion publique sensible à ces questions, mais qui reste opposée à voir la facture énergétique augmenter (40% des Néerlandais ne se disaient pas prêts à donner plus d'argent pour lutter contre le réchauffement climatique fin 2018).

Le PBL[85] et le CPB[86] prévoient que cet objectif de réduction de moitié ne sera pas tenu. Il reste que le gouvernement continue à défendre une politique volontariste, et que l'énergie éolienne connait un développement rapide aux Pays-Bas. La durée de vie limitée des installations laisse entrevoir un programme de démantèlement d'une partie du parc éolien dans les années à venir. Dès lors, la question du recyclage et de l'insertion des éoliennes dans une boucle d'économie circulaire se pose. De plus, la coalition issue des élections de mars 2017 a fait de l'économie circulaire un volet important d'une politique climatique ambitieuse, capitalisant sur des expériences engagées depuis le début des

[82] Seul 6,6% de l'énergie consommée aux Pays-Bas était d'origine renouvelable en 2017, plaçant les Pays-Bas avant-derniers des EM. En 2018, la production a augmentée de 8% par rapport à 2017.

[83] https://www.cbs.nl/nl-nl/publicatie/2017/42/nationale-energieverkenning-2017

[84] https://www.cbs.nl/en-gb/news/2019/09/mainly-more-green-electricity-from-solar-power

[85] Bureau d'études environnementales

[86] Bureau de prévisions macroéconomiques

années 2010, en grande partie fondées sur la collaboration entre secteur public et acteurs privés, notamment au travers des « *Green Deals* ».

Q1/- Flux à traiter : Combien d'éoliennes doivent être démantelées entre 2018 et à 2030, en GW et en tonnage si possible (total, béton, acier, non ferreux, composites et/ou plastiques) ? Quelles sont les perspectives de puissances installées (GW) en éoliennes de 2018 à 2030 ? Existe-t-il des études sur le sujet ?

Nous ne disposons pas d'éléments chiffrés. La durée de vie d'un parc éolien varie entre 20 et 25 ans. A ce jour un seul parc onshore *situé à Lelystad a été démantelé.*

S'agissant des perspectives de puissances installées (GW) en éoliennes à l'horizon 2030, les objectifs sont très ambitieux. 8 GW en onshore, 11,5 GW en offshore. Les Pays-Bas sont donc davantage dans une phase de développement des projets de 2018 à 2030 que de recyclage.

Q2/ Encadrement juridique et réglementaire du recyclage : Les dispositifs de soutien tarifaires (appels d'offres par exemple) font-ils référence à des critères de recyclabilité des éoliennes ? Existe-t-il un encadrement réglementaire pour la fin de vie des parcs éoliens : déconstruction, collecte des différentes pièces, transport vers des unités de traitement et recyclage ? Les opérateurs doivent-ils faire des provisions, par exemple en consignant les sommes nécessaires pour le démantèlement, et la remise en état du site ? Les opérateurs (ou les fabricants d'éoliennes) sont-ils soumis à une taxe, redevance ou contribution pour couvrir l'ensemble des coûts de recyclage ?

Le démantèlement des parcs éoliens aux Pays-Bas respectent les obligations juridiques de la directive-cadre sur les déchets de 2008. Son application revient pour l'essentiel à promouvoir le recyclage des matériaux utilisés. **Dans une dizaine d'années, la première génération de fermes éoliennes néerlandaises atteindra la fin de sa vie.** Trois options ont été étudiées par la partie néerlandaise : allonger la durée de vie des installations, le repowering des installations ou démantèlement des fermes de manière efficace et durable afin d'éviter la pollution des sols. Une étude du centre de recherche appliquée, ECN en date de 2016[87] a conclu que l'allongement du cycle de vie ainsi que le repowering , en particulier à cause de son coût et de la difficulté d'avoir accès à des nombreuses données sur les différentes composantes de l'éolienne, comme moins avantageuse par rapport au recyclage.

L'encadrement juridique est précisé dans le troisième plan national de gestion des déchets (LAP3 Secteur 11 Plastique et caoutchouc). Ce plan interdit la mise en décharge de déchets composites, exception faite des cas où il n'y aurait pas d'autres solutions économiquement possibles à la mise en décharge. Le recyclage demeure dès lors la seule option. Lorsque le coût de la mise en décharge dépasse 205 euros par tonnes, le fournisseur est autorisé à opter pour l'enfouissement. 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.

Les opérateurs ne sont pas soumis à des taxes mais il est obligatoire de réserver des fonds pour démanteler les installations de production d'électricité et le système de raccordement. Les fondations

[87]https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Wind%20op%20Zee/20160509_Rap_ECN_Lifecycle_Decom.pdf

doivent être excavées et remplacées par des terres comparables avant la création du site. Le site doit être remis en état. Toutes ces conditions sont contenues dans les appels d'offres.

Pour le moment les critères de recyclabilité ne sont pas prévus dans les appels d'offres. Ce point est à l'étude, le secteur éolien aux Pays-Bas travaille sur un accord RSE.

La fin de vie des parcs éoliens suit certaines étapes de la déconstruction, à la collecte des différentes pièces, au transport vers des unités de traitement jusqu'au recyclage, même s'il n'existe pas encore un encadrement législatif et réglementaire de cette question. L'industrie néerlandaise est très en pointe sur ces technique, du fait de ses équipements et de son expertise. Ces étapes demandent les mêmes équipements que pour l'installation des fermes éoliennes.

- **Déconstruction** : Il est obligatoire pour les opérateurs d'installations *offshore* de retirer tous les composants des éoliennes quand leurs parcs éoliens sont démantelés. Ils doivent se charger du retrait des matériaux (les monopiles sont retirées ou sciées à la hauteur de la mer ; les plots sont restaurés). La déconstruction doit se faire de manière propre, notamment pour les fermes *on-shore* afin d'éviter toute pollution des sols.

- **Collecte et transport** : La turbine est déconstruite sur le site. Après la déconstruction, toutes les parties peuvent être transportées. Le traitement des pales d'éoliennes restent le défi principal du fait de la complexité des matériaux. Elles sont, en tout cas sur les installations *on-shore*, coupées en petits morceaux sur le site. Plusieurs techniques existent pour le découpage des pièces, notamment le découpage à jets d'eau permettant des coupes propres et limitant la pollution des sols avec les matériaux composites.

- **Recyclage** : L'acier et le cuivre sont recyclés en ferrailles. L'empreinte CO_2 de l'énergie éolienne peut être réduite en recyclant chaque partie des turbines, ses fondations et les infrastructures électriques. Les composants des installations peuvent même avoir une seconde vie. A titre d'exemple, les pales d'éoliennes peuvent être recyclées pour former des installations urbaines. NWEA ne sait pas ce qu'il en est du recyclage des métaux précieux tels que le neodynium, le dysprosium, le praseodymium et le terbium.

Q3/ Filières de recyclage : Existe-t-il des filières de recyclage pour les différents matériaux: béton (fondation), acier (mâts), composites (pales), non-ferreux (turbine). Y a-t-il une filière de collecte spécifique aux éoliennes ? Les terres rares des aimants permanents sont-elles recyclées, et par qui ?

Le gouvernement néerlandais a désigné une entreprise certifiée pour procéder au recyclage des composants éoliens. Cette entreprise a développé un processus complet, du démontage des turbines à la production de nouveaux produits avec les composants recyclés des éoliennes.

Face à un nombre d'éoliennes en croissance exponentielle, la production d'énergie renouvelable ainsi que la circularité des installations produisant ces énergies sont des objectifs affichés du gouvernement. Des initiatives d'acteurs privées innovantes en matière de recyclage des matériaux constituant les éoliennes ont émergé et ont pu être soutenues par le gouvernement néerlandais : c'est le cas de

Demacq Recycling, certifié par l'Etat, et qui opère toutes les phases de la déconstruction, à la collecte et transport jusqu'au recyclage des composants des éoliennes en de nouveaux biens[88].

Q4/ Existe-il des exemples de parcs éoliens démantelés et recyclés ? Si oui, en donner quelques-uns avec si possible des éléments techniques et économiques (articles de presse, CR d'entretiens avec les responsables…) ? -

NWEA : Winpark Lely a été démantelé en 2016. Une vidéo du démantèlement du parc est disponible sur YouTube.

Q5/ Quelles sont les initiatives réglementaires et économiques prises pour favoriser la réutilisation et la rénovation des pièces après démontage (turbines, ou autres) et faire émerger un modèle d'économie circulaire ?

Superuse Studios aux Pays-Bas travaillent sur des conceptions innovantes et durables ainsi que sur la réutilisation des turbines pour des infrastructures urbaines.

Le secteur éolien a pris l'initiative, avec le Ministère des affaires économiques, d'établir un accord. Cet accord a pour but d'identifier et prévenir les risques qui pourraient subvenir dans la chaine logistique. L'extraction de matière première et le recyclage des matériaux utilisés sont deux priorités pour cartographier la chaine logistique et négocier les mesures à prendre pour gérer ces risques.

[88] https://www.demacq.nl/en/recycling-wieken-windmolens/

Pays-Bas annexe 1
LES ACTEURS DU SECTEUR EOLIEN

Les **principaux développeurs** sont E-Connection, Eneco, Essent, Grontmij, Kemperman & Parteners, Nuon, Prodeon, Raedthuys, Renewable Factory, RWE, Ventolines, Winvast, De Wolff, Windunie, Yard Energy.
Les **principaux énergéticiens** sont Eneco, E-ON, Essent, Engie, Nuon, Gemini Offshore.

Les turbiniers néerlandais

2B Energy : 2B Energy développe et commercialise à échelle mondiale un concept de centrale éolienne offshore à cout beaucoup moins élevé. L'entreprise développe des turbines, les installe et propose un service de maintenance.
Darwind : XEMC Darwind est une entreprise néerlandaise/chinoise spécialisée dans le développement et la production de turbines. Elle dispose de l'un des plus importants complexes de fabrication en Chine. Le groupe existe depuis 70 ans et compte 11 000 collaborateurs.
EWT (Emergya Wind Technologies) : EWT est un producteur de turbines à haute performance de 250 KW, 500 KW et 1 MW. EWT fournit également des solutions d'économie d'énergie.
Home Energy : Home Energy offre aux particuliers et aux entreprises la possibilité de se fournir en énergie solaire et éolienne. L'entreprise a créé un concept unique dans lequel la production d'énergie éolienne se produit par une turbine sphérique.
Lagerwey : Lagerwey conçoit et produit ses éoliennes en offrant des produits légers, efficaces et fiables depuis 1979. Leur légèreté permet de réduire les coûts des développeurs de parcs éoliens.
STX Windpower : est une entreprise créée en 2009 à Lelystad, qui se concentre sur le développement et la fabrication d'éoliennes.
WES (Wind Energy Solution) : WES est le fabricant des éoliennes de tailles moyennes WES50, WES80, WES100 et WES250. Ces turbines sont vendues dans le monde entier.
BS Green BV : est fabriquant de turbines. De 2004 à 2016 BS Green B a vendu plus de 300 turbines dans 29 pays.
Dutchwind BV : vendeur d'éoliennes de tous types et de toutes marques, majoritairement d'occasion.

Les principaux fabricants de tours

Lagerwey : Lagerwey est fabricant de turbines mais également de tours.
We4Ce : We4Ce conçoit des pales mais s'occupe également de fabriquer toute autre partie de l'éolienne par l'utilisation de moules ou de techniques de fonte.
Pontis engineering BV : Pontis fournit une large gamme de services couvrant l'ensemble du processus, de la conception à la production au transport du marché des composites avancées.
Mecal : Mecal est à la fois consultant indépendant en ingénierie, et fournisseur d'une large gamme de solutions high-tech. L'entreprise est basée aux Pays-Bas, avec plus de 130 professionnels expérimentés travaillant dans le monde entier. Le concept de la tour ATS a été développé par Mecal pour relever les défis de l'énergie éolienne moderne : conçu à l'origine pour des tours hybrides à grande hauteur, ATS offre une solution aux problèmes de transport des grandes tours.

Les principaux fabricants de fondations

SIF Group : SIF Group est leader dans les fondations offshore pour les éoliennes et plateformes pétrolières et gazières. SIF investit continuellement dans des équipements de production, ce qui lui permet de produire des monopiles XL de 11 mètres de diamètres.

Van Oord : Van Oord a réalisé le projet éolien Gemini Offshore Wind Park de 2016, l'un des plus grands parcs éoliens offshore au monde. L'entreprise se positionne sur plusieurs activités : approvisionnement, installations de fondations, ensemble d'infrastructures électriques y compris l'approvisionnement et l'installation de stations haute tension offshore et terrestre, des câbles inter-réseaux ainsi que l'installation des éoliennes Siemens.

Jumbo : est spécialisé dans le secteur de l'installation de fondation : levage lourd offshore, levage sous-marins, installation de flotteur et d'amarrage.

Autres acteurs impliqués dans la construction de parcs

Grontmij : Grontmij est le 3ème bureau d'études d'ingénierie des Pays-Bas. La société est active dans les domaines de la construction, des infrastructures, de l'environnement, de l'écologie, de l'eau, de l'industrie et de l'énergie.

Ballast Nedam : est une entreprise de développement et de construction, également impliquée dans la construction de parcs éoliens. Ballast Nedam fait partie du groupe Renaissance Groep.

Smulders Groep : spécialisé dans la construction métallique. L'entreprise fabrique, fournit et monte des structures en acier pour le bâtiment et des machineries, y compris pour l'offshore (dans de domaine éolien notamment).

VDL Klima : fait partie du groupe néerlandais VDL situé à Eindhoven. L'organisation conçoit et fabrique des échangeurs de chaleur complets et des ventilateurs pour diverses industries : maritime, conversion d'énergie, agriculture et industrie novatrice.

Heerema Fabrication Group (HFG) : est un groupe spécialisé dans l'ingénierie et la fabrication de grandes structures dans l'industrie offshore et environnementale. HFG conçoit des installations offshores.

Strukton : opère dans le secteur des infrastructures, du ferroviaire et sur le marché du bâtiment. Strukton opère également dans les structures de soutiens pour les stations offshores.

Vryhof Anchors : offre des solutions d'ancrage et d'amarrage novatrices pour les grandes structures flottantes.

Seaway Heavy Lifting : depuis 1992, Seaway Heavy Lifting (SHL) s'est forgé une grande expérience sur les marchés de l'éolien offshore, du pétrole et du gaz. SHL a installé et démantelé plus de 100 plateformes et plus de 200 fondations dans le monde. Pour chaque projet, l'équipe expérimentée de SHL a mis au point le concept d'installation offshore sûr, fiable et économique.

Ampelmann Operations : est une spin-off de l'université de technologie de Delft spécialisée dans le développement, la construction et de solutions d'accès offshore. La technologie centrale est le système intelligent « Ampelmann », inventé pour un accès éolien en mer rapide, sûr et aisé même en condition de grand vent.

Gusto MSC BV : membre du groupe SBM Offshore, Gusto est une société d'ingénierie et de conception de pointe pour tous types de structures mobiles en mer. Ses services comptent : les conceptions spécifiques de plates-formes autoélévatrices et de navires d'installation, la fourniture de systèmes de levage hydrauliques et la fourniture de grues adaptées à l'éolien offshore, de 500 à 1 000 tonnes.

Bluestream offshore : est un fournisseur de services privilégié venant en aide à ses clients pour des travaux en des lieux normalement inaccessibles, sous l'eau ou en hauteur, pour des travaux de

montage, d'inspection, de réparation, d'entretien et de démontage d'éléments de manière sûre, contrôlée et efficace.
Barge Master : Master développe et produit des « wave compensated platforms » pour la marine et le secteur offshore / à proximité des sites de construction côtiers. L'entreprise a été développée conjointement par Bosch Rexroth et l'institut de recherche MARIN.

Transport d'énergie

TenneT : est l'opérateur **national de transport d'électricité aux Pays-Bas**. Depuis 2001, l'entreprise est **détenue à 100% par l'État néerlandais**. Elle assure intégralement l'acheminement et la distribution d'électricité aux Pays-Bas, pour les réseaux d'une tension supérieure ou égale à 110 kV. Au 1er semestre 2017, TenneT a notamment transporté 7,77 TWh d'électricité grâce au raccordement au réseau des parcs éoliens offshore en mer du Nord (soit +50% par rapport à l'année précédente). Au total, **TenneT dispose de 9 systèmes de raccordement au réseau offshore**. La société ajoutera 3 autres systèmes de connexion au réseau d'ici fin 2019, mettant à disposition 7 132 MW depuis la mer du Nord. Par ailleurs, 4 autres plans de connexion sont en cours de discussion pour augmenter la capacité de transmission depuis la mer du Nord à plus de 10 000 MW d'ici 2025.

Pour les réseaux de puissance inférieure à 110 Kv, la distribution est assurée par une vingtaine de gestionnaires des réseaux régionaux, liés aux sociétés spécialisées dans l'énergie, dont les plus importantes sont :
Liander : actif à Amsterdam, dans les provinces de Gueldre et de Frise, Hollande Méridionale et Septentrionale ;
Enexis : actif dans les provinces de Groningue, Drenthe, Overijssel, Limbourg ;
Stedin : actif en Frise, Hollande Méridionale et Septentrionale.

Pays-Bas annexe 2

LE DEVELOPPEMENT DES PARCS EOLIENS AUX PAYS-BAS

1. Le parc éolien *on-shore* le plus important est situé au nord des Pays-Bas au sein du parc énergétique d'**Eemshaven à Groningue**, une zone industrielle dédiée à l'environnement, l'énergie, le recyclage et le traitement des déchets. 88 turbines y ont été installées, dont 21 turbines de 3 MW Vestas V90 pour le compte du consortium Growind. Les autres turbines ont été installées par l'entreprise allemande Enercon pour le compte d'Essent (parc Westereems et turbines aux abords de l'Eemshaven) et par Electrabel (parc Eems). On peut citer d'autres parcs comme celui de **Delfzijl-zuid** (72 MW), de **Lelystad** (46 MW) et de **Terneuzen** (Koegorspolder, 44 MW). Les parcs **Irene Vorrink** (17 MW) et **Lely** (2 MW) sont parfois considérés comme parcs *off-shore*. Ils se situent, néanmoins, dans l'IJsselmeer (lac de l'IJssel), devenu un lac d'eau douce depuis la construction de la digue de fermeture Afsluitdijk qui sépare l'IJsselmeer de la mer des Wadden. **Gemini Park** est quant à lui le plus grand parc éolien offshore néerlandais, et dispose de 150 éoliennes. 3 Mds EUR ont été nécessaires au financement de ce projet, qui a été développé par 4 organisations différentes : Northland Power, Siemens, Van Oord et HVC. Van Oord est responsable de la construction et Siemens est le fournisseur des turbines. La maintenance est effectuée par Siemens Energy Service pour les 15 prochaines années. Le parc possède une capacité de production de 600 MW pouvant fournir en électricité 785 000 foyers aux Pays-Bas, tout en permettant une réduction d'émissions de CO2 de l'ordre de 1,25 millions de tonnes par an.

2. Le développement de l'*offshore* est plus récent mais en forte croissance. Les deux premiers parcs *off-shore* néerlandais en fonction sont le **Prinses Amaliawindpark** (120 MW) et le **Egmond aan Zee** (108 MW). **Actuellement, des parcs éoliens *off-shore* sont en construction**, à savoir **Den Helder Zuid** (768 MW) ; **Oostpolderijk** (il s'agit des premières éoliennes sur digue marine, d'ici 2019 il devrait il y avoir 3 éoliennes) ; et **Windpark Fryslân** (372 MW) (ce projet de parc éolien a débuté en 2008, et a pour but l'installation de 89 éoliennes de 183 mètres de haut ; ce parc sera opérationnel d'ici 2020). **Cinq projets éoliens doivent être construits d'ici 2023** aux Pays-Bas, dont quatre pour lesquels l'appel d'offre a déjà été conclu : Borssele caveaux I et II (750 MW, attribués en juillet 2016 à Dong Energy) ; Borssele caveaux III et IV (731,5 MW, attribués en décembre 2016 au consortium Shell, Eneco, Mitsubishi et Van Oord) ; Hollandse Kust Zuid I et II (capacité de 740 MW, en mars 2018 à Nuon/Vattenfall) pour lequel l'appel d'offre a été attribué sans subvention ; et **Borssele V** (dont l'appel d'offre a été adjudiqué le 5 avril 2018, et remporté par le consortium Van Oord Renewable Finance, Investri Offshore et Green Giraffe Holding. Le parc se composera de deux turbines Vestas d'une capacité de 9,5 MW chacune). **Ces parcs éoliens *off-shore* doivent permettre d'atteindre à l'horizon 2023, 4 450 MW d'électricité par an** (957 MW actuellement). Des appels d'offres en cours pour les projets éoliens *off-shore* Hollandse Kust Zuid III et IV (capacité de 700 MW, adjudication de l'appel d'offre débutera le 1er mars 2019) ; et Hollandse Kust Noord V (capacité de 700 MW, adjudication de l'appel d'offre en 2019).

3. **Le développement des parcs éoliens demeure toutefois inégal. Pour des raisons d'acceptabilité, de nombreuses provinces accusent un retard dans le développement de projets de parcs éoliens**. A titre d'exemple, la province de Drenthe a atteint approximativement 8 % de ses objectifs. Devant certaines résistances, le ministre des affaires économiques s'est interrogé sur la nécessité de l'adoption d'une loi pour contraindre les autorités décentralisées à respecter leurs objectifs. En parallèle, une nouvelle subvention est déployée pour le renouvelable de chauffage (géothermie et panneaux solaires pour les particuliers et les entreprises) depuis le 1er janvier 2016 (ISDE)[89].

[89] Investeringssubsidie duurzame energie (ISDE) voor particulieren en zakelijke gebruikers 2016-2020

Parc éolien	Type de parc	Localisation	Développeur	Main contracter	Opérateur	Propriétaire
Prinses Amalia	Offshore	North Sea, Noord-Holland	Eneco Wind BV : Production et approvisionnement en énergie renouvelable	Van Oord : Installation des foundations, stations offshores et autres	Offshore Windpark Q7	Eneco Wind BV (100%)
Owez / Egmond aan zee	Offshore	Egmond aan Zee, Noord - Holland	NoordzeeWind : Fondé par Shell et Nuon afin de développer des parcs éoliens	Boucombinatie Egmond : Ballast Nedam et Vestas conceptualisent et créent le parc clé en main.	Noordzeewind	Nuon (50%) et Shell (50%)
Luchterd-uiden	Offshore	North Sea, Zuid- Holland	Eneco Wind BV	Van Oord	Eneco Wind B.V	Mitsubishi Corporation (50%) et Eneco Wind B.V (50%)
Westermeewind / Westermeerdijk	Offshore	Ijsselmeer, Flevoland	Ventolines BV : Sous-contractant de Westermeerwind	Siemens Nederland NV : Projet clé en main	Ventolines BV	Westermeer wind BV
Wester-eems	Onshore	Eesmond, Groningen	Enercon : Fabricant d'éoliennes	Enercon	RWE : Conglomérat allemand œuvrant dans le secteur de l'énergie et ayant pour filiale Essent.	RWE / Essent
Princess Alexia	Onshore	Zeewolde, Flevoland	Nuon : Production, transport et distribution d'énergie	REpower, Ventus Zeewolde	Vattenfall (Nuon)	Vattenfall (Nuon)

Source : Bureau Business France

4. Le gouvernement joue un rôle clef dans l'évolution du parc éolien néerlandais. Le gouvernement préconise dorénavant d'installer des turbines rapprochées les unes des autres dans un lieu minutieusement choisi. Cette vision est conforme au programme gouvernemental « *Mooi Nederland* » (« *Pays-Bas attrayants* ») pour la préservation du paysage.

De même, il porte des ambitions futuristes pour les projets de parcs éoliens à venir. **TenneT et le gouvernement néerlandais travaillent en collaboration**[90] afin d'évaluer dans quelles mesures il serait possible de construire une île artificielle dans la zone Ijmuiden Far Offshore pour y placer un convertisseur et une station de transformation, auxquels les différentes fermes éoliennes actuelles et à venir pourraient être connectées. L'objectif de ce projet est une réduction des coûts, car il est moins coûteux que l'installation de multiples plateformes de transformation offshore. La construction de cette île pourrait favoriser la transformation de l'énergie éolienne en hydrogène. **En outre, le développement des énergies renouvelables sur le long terme passe également par le déploiement des technologies les plus efficientes**, en promouvant l'innovation par l'intermédiaire du système d'incitation énergie renouvelable (SDE+)[91]. A titre d'exemple, l'accord sur l'énergie de 2013 stipule que les coûts de réalisation des nouvelles fermes éoliennes *offshore* devront être réduits de 40 %, ce qui

[90] Le gouvernement a fait adopter, le 22 mars 2016 une loi intitulée « Réalisation dans les délais de l'accord sur l'énergie sur l'électricité », qui habilite TenneT comme développeur et opérateur du raccordement des champs éoliennes *offshore.*

91 Le SDE+ est un *feed-in premium* : le producteur, dont le projet est retenu, a la garantie de recevoir la différence entre le prix de base et le prix de l'électricité grise, pendant une durée de quinze années. Il n'y a pas d'obligation de rachat. Le budget alloué au dispositif pour l'année 2014 s'est de 3,5 Md d'euros. L'approche est *« bottom-up »* à savoir que le marché, à travers un dispositif d'appels d'offre, propose les projets au financement avec un filtre qui est l'efficience des technologies, mesurée par le coût de production. Le SDE+ repose en effet sur une mise en concurrence des technologies éligibles et des projets : chaque année, six phases successives d'appel à projets ont lieu où les technologies les plus efficientes sont financées en premier.

se traduirait par une subvention de 12 centimes/kWh. Par conséquent, le gouvernement a réservé un budget maximal de 18 Md € pour subventionner l'éolien marin.

Pays-Bas annexe 3

LA CAPACITE ET LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE (*ON-SHORE* ET *OFF-SHORE*) EN 2018

Subjects	Production			Capacity of wind turbines		
	Production of electricity			Power of wind turbines		
On land/ off shore	Total wind energy	Wind energy on shore	Wind energy off shore	Total wind energy	Wind energy on shore	Wind energy off shore
Periods	*mln kWh*			*MW-electric*		
2017	10 569	6 869	3 700	4 202	3 245	957
2018 January*	1 394	967	428	.	.	.
2018 February*	932	618	314	.	.	.
2018 March*	1 069	739	330	.	.	.
2018 1st quarter*	3 396	2 324	1 072	.	.	.
2018 April*	779	488	292	.	.	.
2018 May*	627	395	232	.	.	.
2018 June*	571	370	201	.	.	.
2018 2nd quarter*	1 978	1 252	725	.	.	.
2018 July*	424	294	130	.	.	.
2018 August*	591	374	216	.	.	.
2018 September*	811	488	323	.	.	.
2018 3rd quarter*	1 826	1 156	670	.	.	.
2018 October*	922	557	364	.	.	.
2018 November*	1 085	692	393	.	.	.
2018 December*	1 301	895	407	4 292	3 335	957
2018 4th quarter*	3 323	2 159	1 164	4 292	3 335	957
2018*	10 549	6 919	3 630	4 292	3 335	957
2019 January*	1 251	880	371	.	.	.

© Statistics Netherlands, Den Haag/Heerlen 29-3-2019

Annexe 7 : Le recyclage des éoliennes au Danemark

Note du Service économique de Copenhague

Éléments locaux de contexte du pays questionné :

Q1/- Flux à traiter : Combien d'éoliennes doivent être démantelées entre 2018 et à 2030, en GW et en tonnage si possible (total, béton, acier, non ferreux, composites et/ou plastiques) ? Quelles sont les perspectives de puissances installées (GW) en éoliennes de 2018 à 2030 ? Existe-t-il des études sur le sujet ?

Entre 2018 et 2030, des éoliennes représentant une puissance totale de 2 GW devraient être démantelées. D'après la *Danish Wind Association*, 80% d'une turbine est composé de métal. Le matériau composite utilisé pour les pales représente environ 12-15 tonnes par MW pour les grandes turbines, mais seulement environ 7 tonnes par MW pour les turbines en dessous de 1 MW, qui sont principalement celles qui sont démantelées pour le moment.

Le plan énergie adopté par le Parlement danois en juin 2018 prévoit l'installation d'au moins 2,4 GW d'énergie éolienne offshore d'ici 2030. Ceci pourrait cependant évoluer, car dans le débat politique actuel, certains partis politiques discutent de 1,6 à 3 GW supplémentaires d'éolien offshore avant 2030. Pour l'éolien terrestre, la perspective est de 200-250 MW par an d'ici 2030.

Q2/ Encadrement juridique et réglementaire du recyclage : Les dispositifs de soutien tarifaires (appels d'offres par exemple) font-ils référence à des critères de recyclabilité des éoliennes ? Existe-t-il un encadrement réglementaire pour la fin de vie des parcs éoliens : déconstruction, collecte des différentes pièces, transport vers des unités de traitement et recyclage ? Les opérateurs doivent-ils faire des provisions, par exemple en consignant les sommes nécessaires pour le démantèlement, et la remise en état du site Les opérateurs (ou les fabricants d'éoliennes) sont-ils soumis à une taxe, redevance ou contribution pour couvrir l'ensemble des coûts de recyclage ?

Non, les dispositifs de soutien tarifaires ne font pas référence à des critères de recyclabilité des éoliennes.

La déconstruction d'un parc éolien se fait sur la base d'un plan détaillé conforme aux meilleures pratiques et à la législation en vigueur et établi en accord avec les autorités compétentes. C'est le propriétaire du parc éolien qui est tenu de préparer ce plan de démantèlement. Le plan est ensuite mis en consultation officielle et doit être approuvé par l'Agence danoise de l'Energie (Energistyrelsen). Il n'y a pas de législation spécifique au traitement et recyclage des déchets éoliens, mais les règles relatives à la gestion des déchets en général s'appliquent également au démantèlement des éoliennes. Ainsi, les déchets dangereux provenant des éoliennes sont traités comme tous les autres déchets dangereux, et il faut les fractionner et les traiter en conséquence. Les propriétaires d'éoliennes paient des entreprises spécialisées dans cette fragmentation pour la gérer adéquatement.

Les développeurs doivent consigner les sommes nécessaires pour le démantèlement.

Il n'y a pas de taxes, redevance ou contribution s'appliquant aux opérateurs ou fabricants pour couvrir les coûts de recyclage.

Q3/ Filières de recyclage : Existe-t-il des filières de recyclage pour les différents matériaux: béton (fondation), acier (mâts), composites (pales), non-ferreux (turbine). Y a-t-il une filière de collecte spécifique aux éoliennes ? Les terres rares des aimants permanents sont-elles recyclées, et par qui ?

Oui, mais pas de filières de recyclage spécifiques pour les éoliennes – elles sont gérées comme les déchets industriels des autres secteurs.

Les aimants permanents comportant des terres rares ont été commercialisés en 2011 par Siemens Wind Power. Ayant une durée de vie de 25 à 30 ans, les turbines de Siemens ne seront pas démantelées avant 2035, et il n'y aura donc pas de marché pour les aimants permanents d'ici 15 ans au moins.

Q4/ Existe-il des exemples de parcs éoliens démantelés et recyclés ? Si oui, en donner quelques-uns avec si possible des éléments techniques et économiques (articles de presse, CR d'entretiens avec les responsables…) ? -

Il y a 20 ans, la plupart des turbines appartenaient à des particuliers et très peu de ceux-ci en possédaient plus de deux ou trois. Il existe donc très peu de parcs éoliens à terre. En 2016, la Danish Wind Association a estimé qu'environ 50% des turbines démantelées au Danemark sont exportées (pour installation dans d'autre pays) ou stockées pour servir de pièces de rechange, car les pièces de rechange – y compris les pales – pour les anciennes turbines ne sont plus fabriquées. Les pales qui ne sont ni exportées ni stockées sont décomposées et incinérées soit dans des centrales, soit dans des fours à ciment. C'est seulement dans une moindre mesure que ces pales sont mises en décharge ou utilisées.

En 2015/2016 le parc éolien offshore de Vindeby a été démantelé. Il s'agit du premier parc éolien offshore au monde et le premier à être démantelé au Danemark. Ce parc éolien était composé de 11 éoliennes Bonus Energy (maintenant Siemens) 450 kV, placées en deux rangs avec environ 300 mètres de distance entre elles. Les éoliennes étaient placées sur des fondations en béton. Le parc appartenait à DONG Energy (aujourd'hui appelé Ørsted).

Q5/ Quelles sont les initiatives réglementaires et économiques prises pour favoriser la réutilisation et la rénovation des pièces après démontage (turbines, ou autres) et faire émerger un modèle d'économie circulaire. ? Quelles sont les modalités de contrôle des activités de collecte et de recyclage ?

L'agence danoise pour la Protection de l'Environnement (Miljøstyrelsen)92 travaille depuis quelques années sur le développement de méthodes pour valoriser les pales de différentes manières. Cinq projets ont reçu une subvention du programme de développement de technologies environnementales (le MUDP)[93]. L'un des défis majeurs pour la valorisation des pales est la taille de

[92] Sous tutelle du ministère de l'Environnement et de l'Alimentation

[93] Le MUDP a pour objectif de promouvoir le développement et l'utilisation de nouvelles solutions environnementales efficaces sur des problèmes environnementaux prioritaires, tout en soutenant, entre autres, la croissance et l'emploi. Cela se fait par le biais de subventions pour le développement, l'essai et la démonstration de nouvelles technologies environnementales, et de subventions pour des projets capables de tester de nouvelles technologies environnementales dans des usines à grande échelle ou pour de nouveaux projets de construction. Le MUDP aide les entreprises, les

celles-ci, qui les rend difficiles à manipuler sur le plan logistique. La division des pales et la production d'un matériau uniforme sur lequel on peut travailler ont donc, entre autres choses, été examinées dans plusieurs projets. Jusqu'à présent, la production de barrières sonores aux abords des routes est l'un des projets les plus réussis. La production pilote de ce projet a été achevée à la mi-2016 et les connaissances et l'expérience acquises constituent une bonne base pour la production commerciale future.

entrepreneurs et les chercheurs à avoir une meilleure base pour le développement de technologies environnementales, afin que celles-ci répondent aux prévisions de futurs défis environnementaux au Danemark, dans l'UE et dans le monde.

Annexe 8 : Le recyclage des éoliennes en Allemagne

Éléments locaux de contexte du pays questionné (note OFATE) :

Q1/- Flux à traiter : Combien d'éoliennes doivent être démantelées entre 2018 et à 2030, en GW et en tonnage si possible (total, béton, acier, non ferreux, composites et/ou plastiques) ? Quelles sont les perspectives de puissances installées (GW) en éoliennes de 2018 à 2030 ? Existe-t-il des études sur le sujet ?

L'étude de référence sera une étude commandée par l'Agence fédérale allemande de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA) sur un démantèlement des éoliennes économe en ressources. Jusqu'à présent, les résultats finaux n'ont pas encore été publiés ; leur publication est attendue pour juin 2019. Il y existe néanmoins des *résultats préliminaires* qui sont cités ci-dessous[94]. De plus, l'étude a réalisé des analyses complémentaires, ces résultats seront disponibles dès la parution de l'étude en juin 2019.

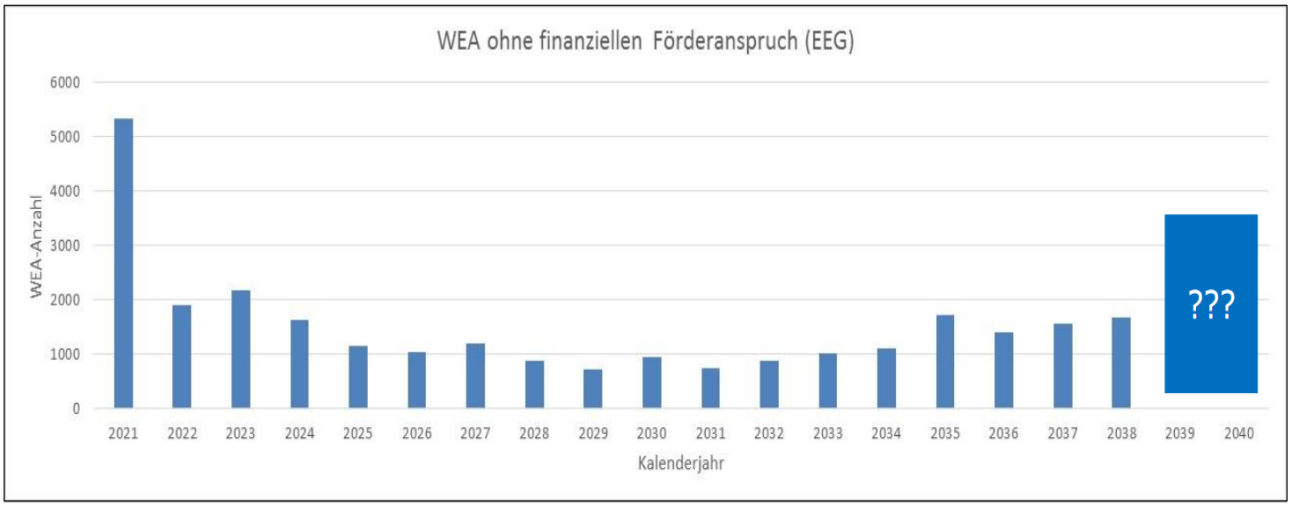


Figure 1 : Nombre d'installations sortant du mécanisme des tarifs d'achat instauré par la loi allemande sur les énergies renouvelables (*Erneuerbare-Energien-Gesetz*, EEG)

Source : Langner 2018[95]

[94] Les informations sont tirées de deux documents sur les résultats préliminaires, une présentation lors d'un colloque technique à Brême de septembre 2018 : Langner 2018, *Entwicklung eines Konzeptes und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von WEA* (Élaboration d'un concept et mesures pour un démantèlement d'éoliennes économe en ressources), intervention lors de la journée d'échanges consacrée à la fin de vie des éoliennes, (lien, en allemand) et les diapositives de la présentation des résultats préliminaires du 1 avril 2019, (non-publiées, déjà évoqué par mail).

[95] Langner 2018, p. 10, (lien, en allemand).

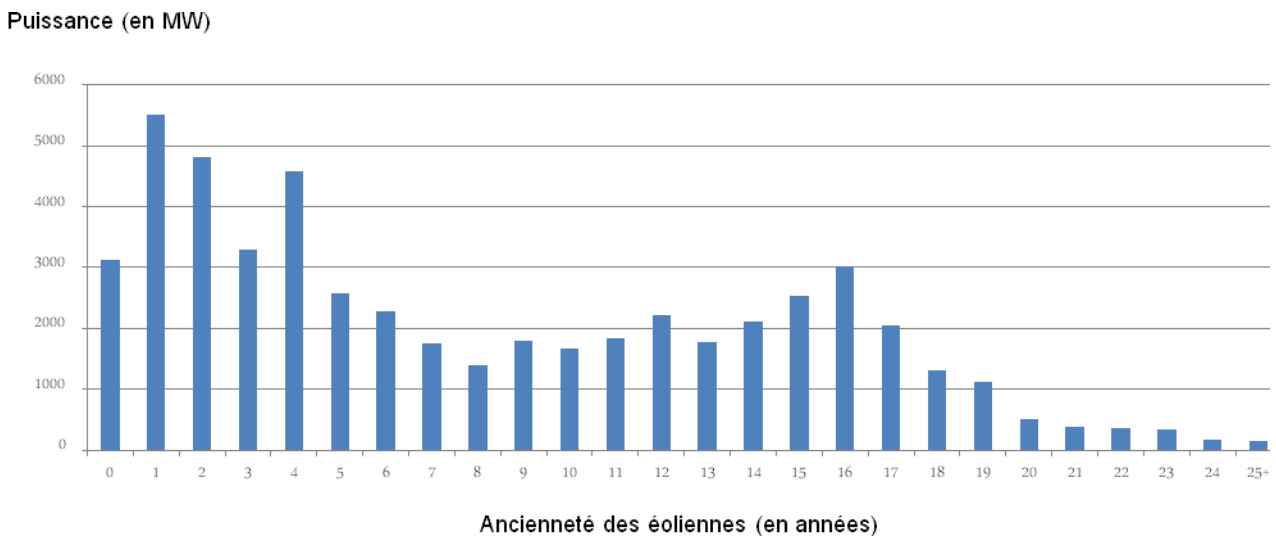


Figure 2 : Structure d'ancienneté des éoliennes terrestres allemandes selon leur puissance installée en 2018

Source : baromètre éolien (Windmonitor) de l'institut Fraunhofer IWES 2018, mise en forme : OFATE

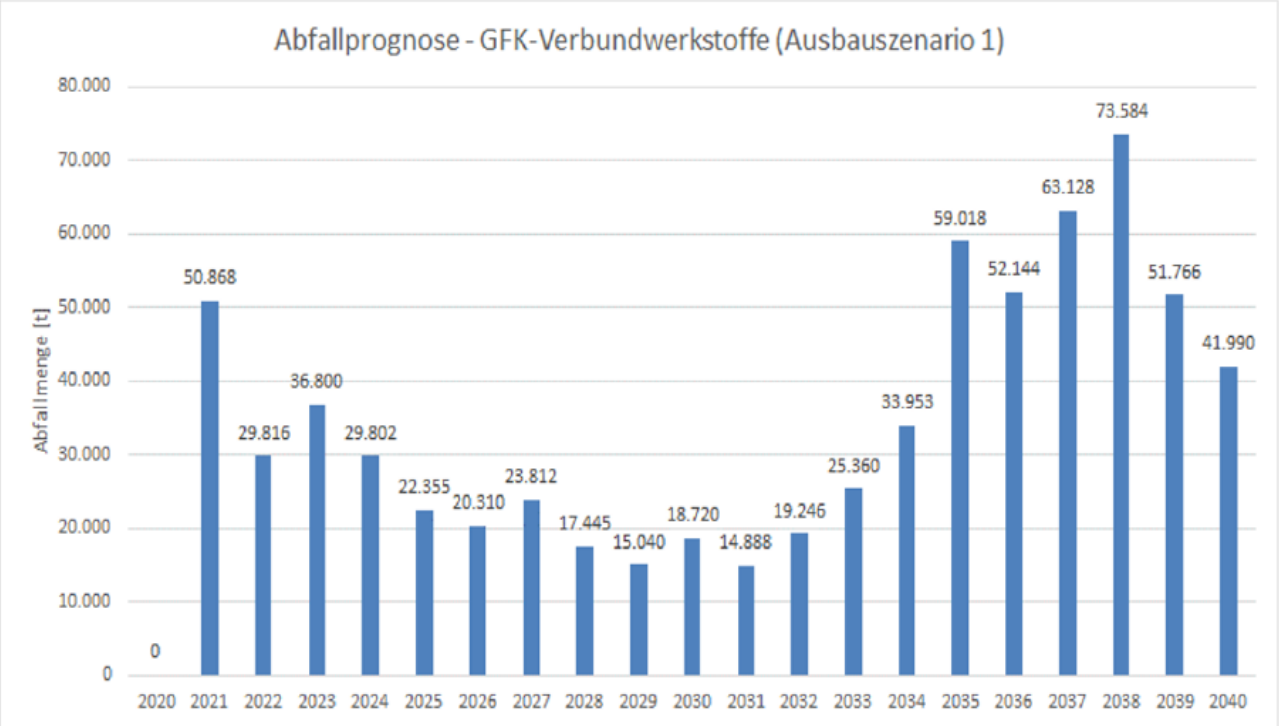


Figure 3 : Quantité de matériaux composites en fibre de verre à traiter pour la période 2021-2040 [en tonnes]

Source : Ramboll 201996, p. 50

[96] Ramboll 2019, Discussion technique WEACycle Berlin, 1 avril 2019, p. 58.

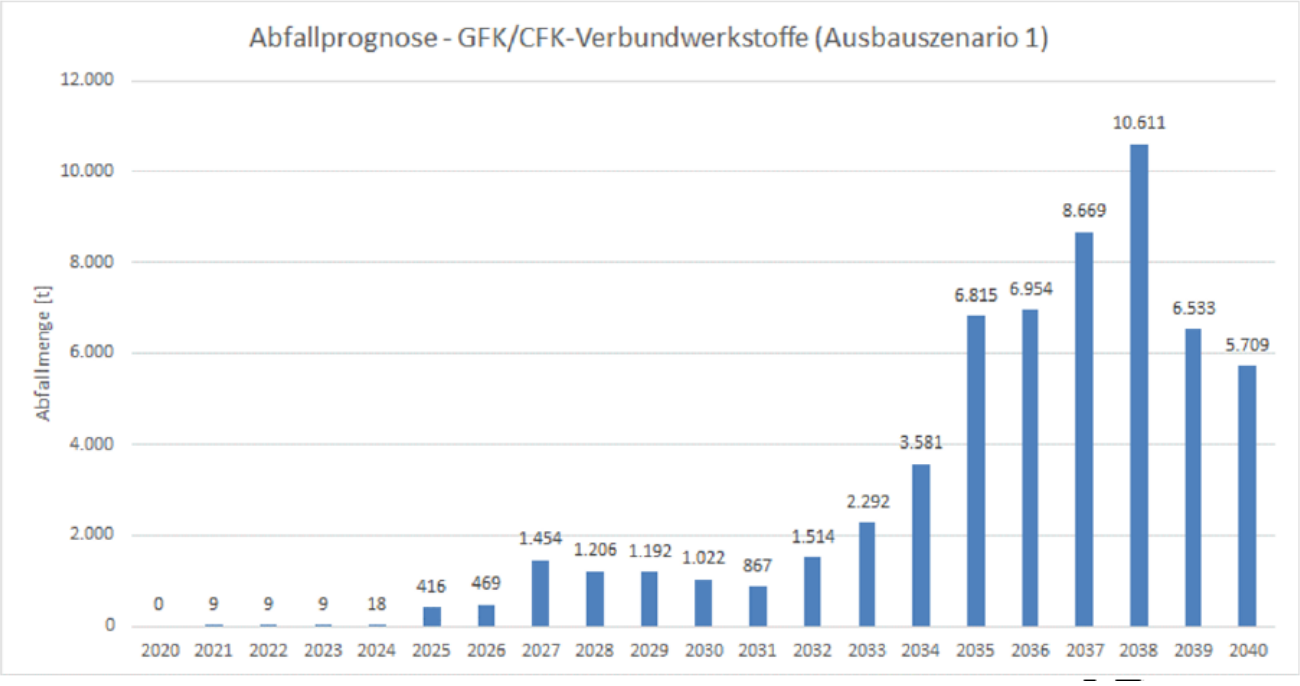


Figure 4 : Quantité de matériaux composites en fibre de verre et de carbone à traiter pour la période 2021-2040 [en tonnes]

Source : Ramboll 2019, p. 50

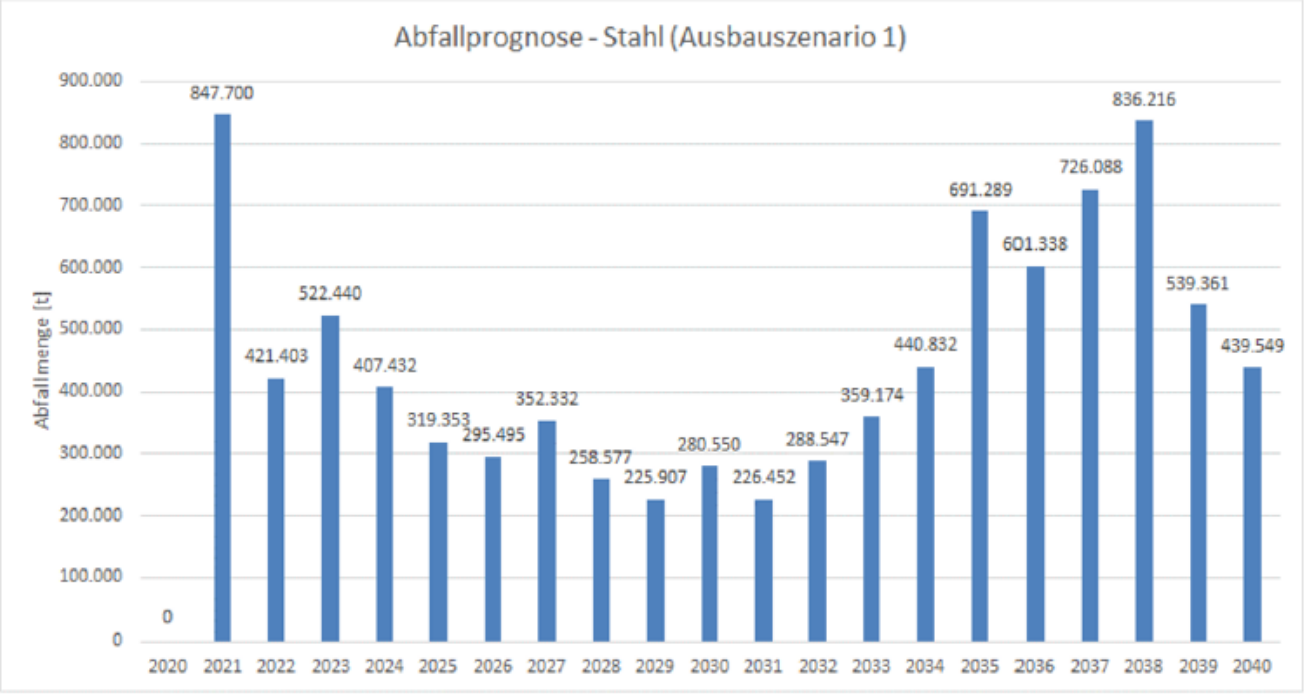


Figure 5 : Quantité d'acier à traiter pour la période 2021-2040 [en tonnes]

Source : Ramboll 2019, p. 51

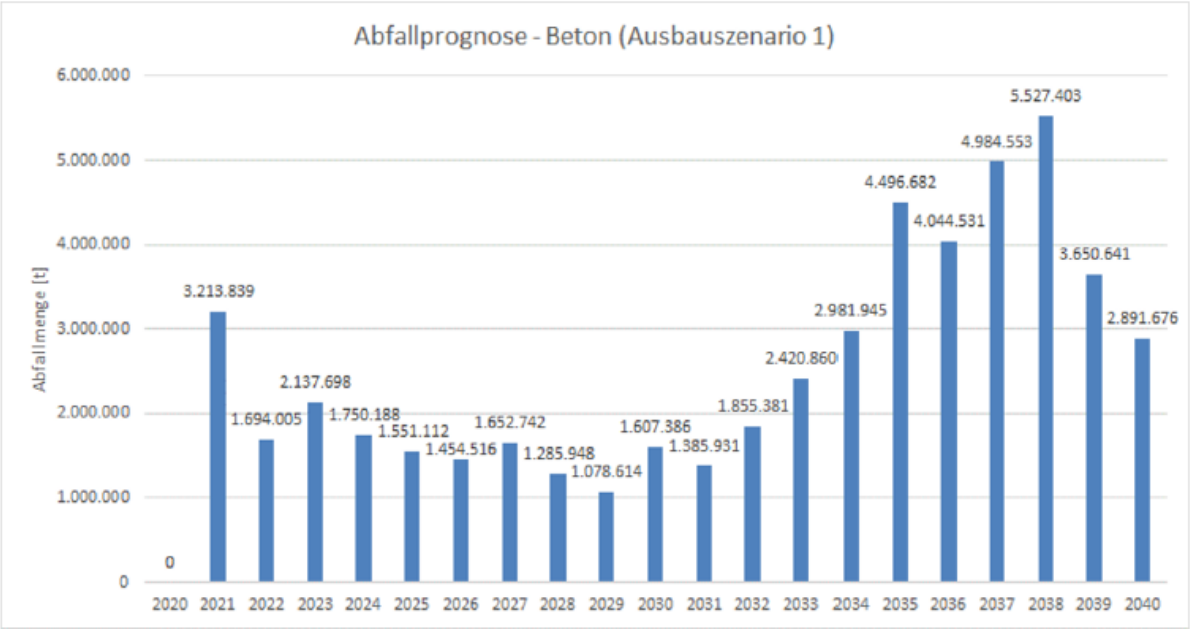


Figure 6 : Quantité de béton à traiter pour la période 2021-2040 [en tonnes]

Source : Ramboll 2019, p. 51

Concernant les perspectives de puissance installée pour l'éolien terrestre pour la période 2018-2030, le graphique ci-dessous illustre les volumes des appels d'offres depuis leur généralisation en 2017.

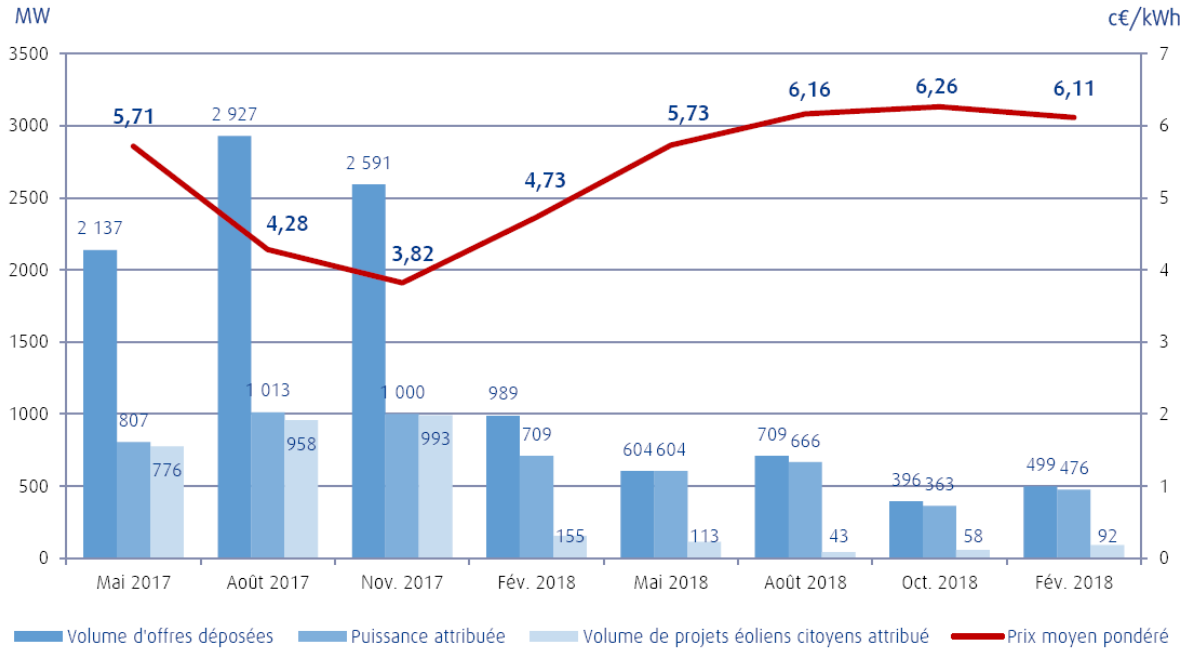


Figure 7 : Résultats des appels d'offres pour l'éolien terrestre depuis leur introduction en 2017, chiffres BNetzA et FA Wind, mise en forme OFATE

En outre, le projet de plan national énergie-climât de l'Allemagne prévoit jusqu'en 2030, des volumes de 2 900 MW par an à partir de 2020 (NECP Allemagne, p. 54), avec des appels d'offres supplémentaires de 4 GW pour la période 2019-2021:

Per technology, the quantities for tender up to 2030, as established in the Renewable Energy Sources Act 2017, are as follows:

- For onshore wind, starting in 2017, calls for tender are being conducted for 2,800 MW each year for three years; from 2020 the figure is 2,900 MW each year; the Omnibus Energy Act provides for special tenders, relating to an additional 4 GW, spanning the period 2019–2021.

Q2/ Encadrement juridique et réglementaire du recyclage : Les dispositifs de soutien tarifaires (appels d'offres par exemple) font-ils référence à des critères de recyclabilité des éoliennes ? Existe-t-il un encadrement réglementaire pour la fin de vie des parcs éoliens : déconstruction, collecte des différentes pièces, transport vers des unités de traitement et recyclage ? Les opérateurs doivent-ils faire des provisions, par exemple en consignant les sommes nécessaires pour le démantèlement, et la remise en état du site ? Les opérateurs (ou les fabricants d'éoliennes) sont-ils soumis à une taxe, redevance ou contribution pour couvrir l'ensemble des coûts de recyclage ?

Les dispositifs de soutien tarifaires allemands ne font pas référence à des critères de recyclabilité des éoliennes jusqu'à présent.

Pour obtenir une autorisation d'exploitation, depuis 2004, les opérateurs de parcs éoliens doivent déposer une déclaration personnelle comme prérequis supplémentaire dans laquelle ils s'engagent à démanteler les éoliennes concernées[97]. Soumis à autorisation, le démantèlement d'une éolienne est instruit par les services de l'urbanisme au niveau du Land. Le démantèlement et l'élimination des éoliennes obsolètes incombent à leur dernier propriétaire. Les coûts de démantèlement sont supportés par l'exploitant. Les principes juridiques relatifs à ces opérations sont prévus dans l'article 35 du code de l'urbanisme allemand (Baugesetzbuch, BauGB). L'octroi d'une autorisation, conformément à la loi fédérale allemande de protection contre les nuisances environnementales (Bundes-Immissionsschutzgesetz, BImSchG), qui inclut le permis de construire, est lié à une obligation de démanteler pour le pétitionnaire ainsi qu'au paiement d'une garantie financière couvrant le coût de démantèlement.

L'étendue précise du démantèlement requis dépend des contraintes fixées dans la procédure d'autorisation pour chaque projet éolien et donc du droit de chaque Land. Les contrats de location conclus avec les propriétaires fonciers prévoient également, en règle générale, l'obligation pour les opérateurs de parcs éoliens d'enlever les fondations des installations. Dans la plupart des cas, il est prévu que le propriétaire foncier puisse réutiliser sa terre à des fins agricoles après le démantèlement de l'installation. Cette obligation de démantèlement issue du droit privé n'a cependant aucune influence sur l'obligation de démantèlement de l'opérateur d'après le code de l'urbanisme allemand.

Les déclarations d'engagement déposées par les exploitants ne comportent toutefois aucune possibilité de sanction en cas de non-respect de ces engagements. Pour éviter les problèmes, par exemple en cas d'insolvabilité de l'exploitant, le législateur a prévu des obligations garantissant les coûts de démantèlement dans les autorisations sur la base de l'article 35 paragraphe 5 alinéa 3 et suivants du BauGB, comme des réserves financières ou des cautions bancaires. Régulièrement, et au plus tard avant le démarrage du chantier, l'exploitant est tenu de fournir une garantie financière,

[97] Agence de l'énergie du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (*Energieagentur NRW*) 2015, Rückbau von Windenergieanlagen: Eine ungelöste Problemâtik? , (lien vers l'article, en allemand). Il n'y a pas d'obligation globale de démantèlement au niveau fédéral pour les installations mises en service avant l'entrée en vigueur de la version 2004 du BauGB. Au lieu de cela, des exigences s'appliquent au niveau des Länder et au niveau municipal.

souvent sous forme de caution bancaire solidaire[98]. En outre, un plan de démantèlement et d'élimination des déchets est généralement requis. Le contrôle du respect de ces exigences incombe aux services administratifs de délivrance des autorisations de chaque Land.[99]

Il n'existe aucune formule de calcul applicable au niveau national pour définir le montant de la garantie, ni l'étendue du démantèlement. Par ailleurs, les coûts de démantèlement varient fortement d'un parc à un autre et dépendent de toute une série d'autres facteurs, comme de la technique de démantèlement employée. En Rhénanie-du-Nord-Westphalie, par exemple, 6,5 % de l'ensemble des coûts d'investissement sont destinés au démantèlement[100]. En Hesse et en Basse-Saxe, le montant de la garantie est calculé selon la formule suivante : « hauteur du moyeu (m) * 1000 = montant de la garantie (€) », des dérogations étant prévues dans des cas individuels par le décret sur l'énergie éolienne en Basse-Saxe[101]. Dans le code de l'urbanisme du Land de Saxe-Anhalt, le montant de la garantie est estimé à environ 30 000 € par mégawatt de puissance électrique installée[102].

Q3/ Filières de recyclage : Existe-t-il des filières de recyclage pour les différents matériaux: béton (fondation), acier (mâts), composites (pales), non-ferreux (turbine). Y a-t-il une filière de collecte filière de collecte spécifique aux éoliennes ? Les terres rares des aimants permanents sont-elles recyclées, et par qui ?

D'après les informations de l'Association des ingénieurs allemands (*Verein Deutscher Ingenieure*, VDI), il existe des techniques de collecte et de traitement des déchets sans surcoût pour le béton et l'acier qui, en plus, permettent d'économiser les ressources. Ainsi, le béton broyé peut servir à combler le sol lors de la construction de routes.[103] Concernant les terres rares, une analyse de l'institut de recherche allemand « Öko-Institut » de 2011 a montré que des concepts de recyclage sont toujours peu développés.[104] De même, des circuits de collecte et de traitement des métaux présents dans la nacelle se mettent en place. En outre, les acteurs souhaitent permettre une réutilisation du béton recyclé dans les nouvelles installations éoliennes. À cela, s'ajoute un certain nombre de plateformes de revente des composants des éoliennes, actives en Allemagne et à l'étranger, et des acteurs industriels qui ont des services dédiés à la revente[105].

Q4/ Existe-il des exemples de parcs éoliens démantelés et recyclés ? Si oui, en donner quelques-uns avec si possible des éléments techniques et économiques (articles de presse, CR d'entretiens avec les responsables…) ?

---

[98] Energieagentur NRW 2015.

[99] Ministère fédéral allemand de l'Économie et de l'Énergie (*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, BMWi) 2018, Question du groupe parlementaire FDP relative au contrôle et au traitement des déchets éoliens, p. 4, (lien, en allemand)..

[100] Ministerialblatt NRW 2018, art. 5.2.2.4.

[101] Ministère de l'économie, des transports et du développement régional de Hesse 2013, Décret relatif à la mise en œuvre des exigences de la loi fédérale sur la planification de la construction concernant l'obligation de démantèlement et la constitution d'une garantie, Ziff. 2.III.2., (lien, en allemand) / Journal officiel du Land Basse Saxe (*Ministerialblatt Niedersachsen*) 2016, Décret sur l'énergie éolienne (Windenergieerlass), Ziff. 3.4.2.3., (lien, en allemand).

[102] Ministerium für Bau und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt 2005, Hinweise zur Umsetzung bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung, Ziff. 4.2., (lien, en allemand).

[103] Association des ingénieurs allemands (*Verein Deutscher Ingenieure*, VDI) 2014, Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen, p. 19, 35, (lien, en allemand).

[104] Schüler et al. 2011, Study on Rare Earths and Their Recycling, (lien, en anglais).

[105] On peut citer des plateformes comme wind-turbine.com et Spares in Motion, et des services dédiés, notamment par Baywa r.e. et Deutsche Windtechnik.

Les acteurs industriels allemands ont de nombreuses années d'expérience dans le domaine du démantèlement des installations éoliennes (au-delà de 2 GW de puissance installée). Les volumes estimés des projets démantelés sont décrits dans la figure ci-dessous :

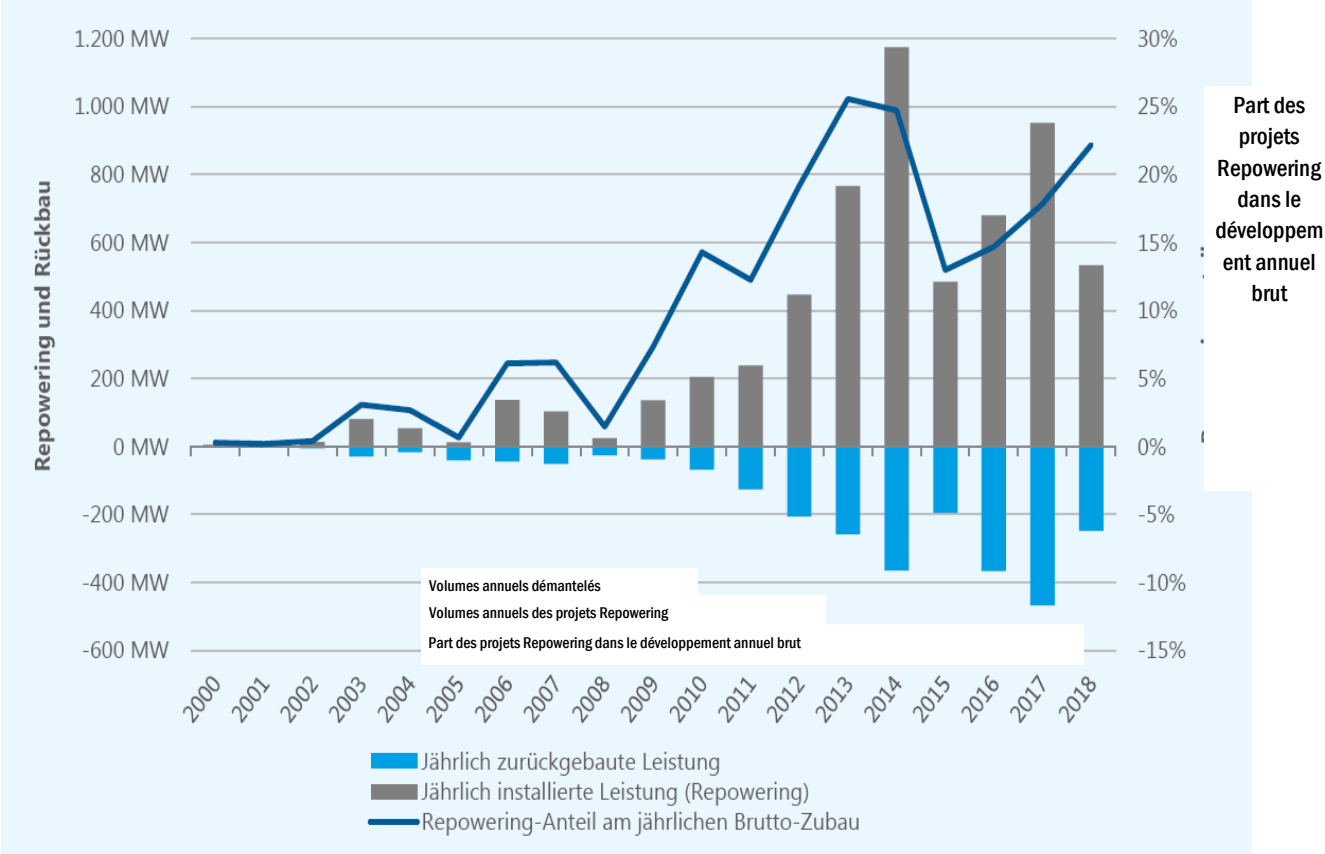


Figure 8 : Volumes annuels démantelés et projets *Repowering* en Allemagne pour la période 2000-2018
Source : Deutsche Windguard 2019[106]

Concernant des projets concrets, à titre d'exemple, l'entreprise allemande *Deutsche Windtechnik*, expert technique spécialisé dans la filière éolienne, a publié une liste de projets de référence concrets sur son site web (en allemand). Le premier projet cité, datant de 2009, montre un aperçu de certains projets de démantèlement réalisés par *Deutsche Windtechnik* en Allemagne (et un projet en 2018 au Pays-Bas). Ces exemples sont illustrés ci-dessous :

[106] Deutsche WindGuard 2019, Status des Windenergieausbaus an Land – Jahr 2018, p. 5, (lien, en allemand).

Jahr	Standort	WEA-Kennzahlen	Durchgeführte Arbeiten
2018	Eemshaven (Niederlande)	2 x Enercon E-82/3MW, Nabenhöhe 98 m	Rückbau inkl. Fundamentabbruch An- und Verkauf einzelner Komponenten
2017	Kyritz (Brandenburg)	6 x NEG Micon NM60/1000, Nabenhöhe 70 m	Rückbau inkl. Fundamentabbruch An- und Verkauf von WEA und einzelner Komponenten
2016	Drochtersen (Niedersachsen)	1 x Enercon E-70, Nabenhöhe 65 m 2 x NEG Micon NM64c/1500, Nabenhöhe 68 m	Rückbau inkl. Fundamentabbruch An- und Verkauf von WEA
2015	Meynfeld-Ost (Schleswig-Holstein)	9 x Südwind S-70 1500, Nabenhöhe 65 m	Rückbau inkl. Fundamentabbruch An- und Verkauf von WEA und einzelner Komponenten
2013	Bokel-Ellerdorf (Schleswig-Holstein)	9 x Nordtank NTK1500, Nabenhöhe 68 m	Rückbau inkl. Fundamentabbruch An- und Verkauf von WEA
2011	Wohnste (Niedersachsen)	20 x Enercon E-40/6.44, 10 x Enercon E-66/18.70 Nabenhöhen 65 m	Rückbau inkl. Verladung An- und Verkauf von WEA
2009	Wehren (Schleswig-Holstein)	8 x Enercon E-40/5.40, Nabenhöhe 48 m	Rückbau inkl. Fundamentabbruch An- und Verkauf von WEA

Figure 9 : Projets de démantèlement réalisés par l'entreprise *Deutsche Windtechnik* pour la période 2009-2018
Source : Deutsche Windtechnik 2019