



Démantèlement et recyclage des éoliennes : de la conception à la fin de vie

Conférence du 12 mars 2020

Juin 2020

Auteure :
Stéphanie Jallet, OFATE • stephanie.jallet.extern@bmwi.bund.de

Soutenu par :



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Soutenu par :





Synthèse

Cette synthèse présente les principaux résultats de la conférence sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes en France et en Allemagne (voir le [programme](#) de la conférence). Cette manifestation organisée par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE) s'est déroulée le 12 mars 2020, dans les locaux du Ministère fédéral allemand de l'Économie et de l'Énergie (BMWi), à Berlin.

Cette conférence a été l'occasion pour les participants d'échanger sur les thématiques suivantes : l'état des lieux sur la fin de vie des parcs éoliens en Europe (I), le cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en France et en Allemagne (II), les procédures et les coûts de démantèlement (III) et l'économie circulaire pour la filière éolienne (IV).

Elle a rassemblé environ 55 participants issus d'entreprises du secteur de l'énergie français et allemand, des fédérations professionnelles, du monde de la recherche et de la presse.

Les présentations (en anglais) des intervenants à cette conférence sont téléchargeables sur le [site internet de l'OFATE](#). Les enregistrements sonores de ces interventions et de la table ronde sont consultables après connexion à l'espace réservé aux adhérents. La présente synthèse n'est pas une transcription littérale de ces interventions. Elle reprend en revanche les sujets abordés en les examinant de plus près dans le contexte franco-allemand.

Disclaimer

Le présent texte a été rédigé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE). La rédaction a été effectuée avec le plus grand soin. L'OFATE décline toute responsabilité quant à l'exactitude et l'exhaustivité des informations contenues dans ce document.

Tous les éléments de texte et les éléments graphiques sont soumis à la loi sur le droit d'auteur et/ou d'autres droits de protection. Ces éléments ne peuvent être reproduits, en partie ou entièrement, que suite à l'autorisation écrite de l'auteur ou de l'éditeur. Ceci vaut en particulier pour la reproduction, l'édition, la traduction, le traitement, l'enregistrement et la lecture au sein de banques de données ou autres médias et systèmes électroniques.

L'OFATE n'a aucun contrôle sur les sites vers lesquels les liens qui se trouvent dans ce document peuvent vous mener. Un lien vers un site externe ne peut engager la responsabilité de l'OFATE concernant le contenu du site, son utilisation ou ses effets.



Contenu	
Synthèse	2
Disclaimer	2
Introduction	4
I. État des lieux sur la fin de vie des parcs éoliens en Europe	6
I.1. Démantèlement et repowering des parcs éoliens en Europe : état des lieux	6
I.2. Impact des réglementations nationales existantes en Europe sur la gestion de fin de vie des éoliennes	7
II. Cadre réglementaire du démantèlement et du recyclage des éoliennes en France et en Allemagne	8
II.1. Cadre juridique européen du recyclage des éoliennes	8
II.2. Cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en Allemagne	9
II.3. Cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en France	12
III. Procédures et coûts de démantèlement	14
III.1. Le démantèlement dans la pratique	14
III.2. Coûts de démantèlement	14
IV. Économie circulaire pour la filière éolienne en France et en Allemagne	16
IV.1. Définition et approche théorique	16
IV.2. Approches innovantes pour une économie circulaire dans la filière éolienne : de la conception au recyclage	17
IV.2.1. Conception des matériaux : développement d'une pale en matériaux recyclables	18
IV.2.2. Une « seconde vie » pour les éoliennes	18
IV.2.3. Recyclage des éoliennes	19



Introduction

Les parcs éoliens en France et en Allemagne bénéficient de mécanismes de soutien leur assurant une rémunération garantie à un certain niveau pendant une durée de 15 ou 20 ans. À l'issue de cette période de contrat d'achat, trois options sont envisageables : la poursuite d'exploitation du parc en dehors du mécanisme de soutien initial, le démantèlement complet du parc ou encore un démantèlement accompagné d'une réinstallation immédiate d'éoliennes nouvelles et plus modernes sur le même terrain (dit *repowering*).

Quelle que soit l'option retenue dans ce premier temps, la question du démantèlement et de la valorisation des matériaux récupérés se posera pour tous les parcs à la fin de leur durée d'exploitation. En France et en Allemagne, les opérateurs de parcs éoliens seront de plus en plus souvent confrontés à cette question dans les années à venir, à mesure que les premiers parcs installés arrivent à la fin de leur contrat d'achat.

Le parc éolien français est en moyenne plus récent que le parc allemand mais les installations bénéficiaient d'une durée de contrat d'achat de 15 ans – et non de 20 ans comme aujourd'hui – jusqu'à la réforme des mécanismes de soutien en 2017. De ce fait, selon l'Agence française de la transition écologique (Ademe), une capacité installée de 1 GW devrait être démantelée chaque année à partir de 2025.¹ En Allemagne, une capacité de 1,6 GW aurait déjà été démantelée à mi-2017, dans le cadre de projets de *repowering*.² Entre 2020 à 2025, plus de 2 GW par an cesseront de bénéficier des tarifs d'achat à l'issue de la durée de soutien fixée à 20 ans.³

Comme l'a rappelé Sven Rösner, Directeur de l'OFATE, en introduction de la conférence, des questions juridiques et économiques, telles que la réglementation ou l'ajustement des montants de garantie pour le démantèlement, se posent donc à peu près au même moment dans les deux pays.

Dans ce contexte, le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD)⁴, en France, et l'Office fédéral allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA) en Allemagne ont chacun publié en 2019 un état des lieux du démantèlement et du recyclage des éoliennes dans leur pays.⁵ Ces deux rapports ont fait l'objet d'une traduction dans l'autre langue par l'OFATE. Les autorités françaises prévoient également au moment de la conférence d'introduire, dans le projet de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)⁶, une clause rendant obligatoire d'ici 2023 le « recyclage des matériaux constitutifs des éoliennes lors de leur démantèlement ».

¹ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), Étude sur la filière éolienne française : bilan, prospective, stratégie, p. 62, 2017 ([lien](#)).

² Deutsche WindGuard 2017, Perspektiven für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 2020, p. 30, ([lien](#), en allemand).

³ Gestionnaires de réseaux de transport allemands (Deutsche Übertragungsnetzbetreiber) 2018, EEG-Anlagenstammdaten zur Jahresabrechnung 2017, ([lien](#) vers les données, en allemand)

⁴ CGEDD, Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, mai 2019 ([lien](#))

⁵ Office fédéral allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA), Développement d'un concept et de mesures pour un démantèlement des éoliennes économe en ressources, octobre 2019 ([lien](#), en allemand)

⁶ La clause a été conservée dans le projet final, publié en avril 2020: MTES, Programmation pluriannuelle de l'énergie, p. 121 ([lien](#))



PROGRAMME DE LA CONFÉRENCE

L'ensemble des présentations (en anglais) et des enregistrements des interventions peut être téléchargé sur le [site internet de l'OFATE](#).

Mots de bienvenue

- Sven Rösner, Directeur, Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE)

DÉMANTÈLEMENT ET RECYCLAGE DES ÉOLIENNES EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE : CADRE RÉGLEMENTAIRE ET ÉTAT DES LIEUX

Cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en Allemagne

- Petra Weißhaupt, Département III 1.6 Produits et production durables, économie circulaire, Office fédéral allemand de l'environnement (UBA)

Cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en France

- Sibylle Weiler, Avocate associée, Bird & Bird

Marché, acteurs et flux actuels du démantèlement et recyclage des éoliennes en Europe

- Félix Gorintin, Responsable du département Conseil en Stratégie, INNNOSEA-LOC Group

LE DÉMANTÈLEMENT DANS LA PRATIQUE

Méthodes, coûts et retour d'expérience sur le démantèlement de parcs éoliens en Allemagne

- Jens Monsees, Head of Project Management Repowering & service, Wörmann-Team

ANALYSE DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES ÉOLIENNES : DU RECYCLAGE À LA CONCEPTION

« Seconde vie » pour les éoliennes : Aperçu du marché mondial de revente des anciennes éoliennes

- Bernd Weidmann, Chief Executive Officer, Wind-turbine.com

Traitement et recyclage du béton issu des éoliennes

- Benoist Thomas, Secrétaire général, Syndicat national du béton prêt à l'emploi (SNBPE)

EFFIWIND: développement d'une nouvelle génération de pales d'éolienne à base de matériaux recyclables

- Christophe Magro, Sous-Directeur et Responsable Projets Coopératifs, CANOE

Keynote - Scénarios et perspectives pour une économie circulaire dans le domaine de l'éolien en France

- Sébastien Billeau, Ingénieur filière éolienne, Service Réseaux et Energies Renouvelables, Direction Productions et Energies Durables, Ademe

Table ronde : Du recyclage à la conception, comment permettre une économie circulaire dans le domaine de l'éolien en France et en Allemagne ?

- Wolfram Axthelm, Directeur Stratégie et politique, Syndicat allemand de l'éolien (BWE)
- Sébastien Billeau, Ingénieur filière éolienne, Service Réseaux et Energies Renouvelables, Direction Productions et Energies Durables, Ademe
- Kerstin Dorenbusch, Directrice Environnement, Enercon
- Petra Weißhaupt, Département III 1.6 Produits et production durables, économie circulaire, Office fédéral allemand de l'environnement (UBA)

I. État des lieux sur la fin de vie des parcs éoliens en Europe

I.1. Démantèlement et repowering des parcs éoliens en Europe : état des lieux

Dans sa présentation, Félix Gorintin (Innosea LOC Group) a donné un aperçu global du marché du démantèlement des éoliennes en Europe. Le graphique ci-dessous expose les capacités démantelées et les nouvelles capacités issues d'un repowering entre 2009 et 2019⁷ :

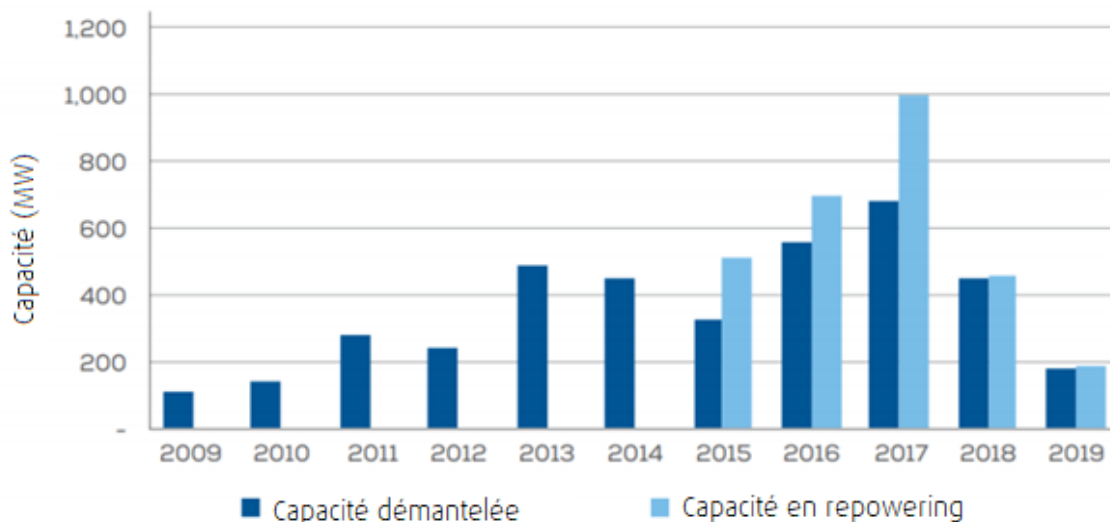


Figure 1 : Capacités démantelées et en repowering de 2009 à 2019 en Europe

Source : Présentation F.Gorintin, [WindEurope](#) (2019)

Avec 249 MW démantelés en 2018 et 97 MW en 2019, l'Allemagne rassemble à elle seule environ la moitié des démantèlements en Europe ces dernières années. En comparaison, seule une quinzaine de projets a fait l'objet d'un démantèlement à l'heure actuelle en France. Ces chiffres reflètent l'âge moyen du parc, plus élevé en Allemagne, comme au Danemark par exemple, où 50% des parcs éoliens ont plus de 15 ans.⁸

Selon les chiffres de la fédération européenne Windeurope, 22 GW devraient arriver en fin de soutien public entre 2019 et 2023 à l'échelle européenne. Selon Félix Gorintin la grande majorité des projets (17,8 GW) devraient se diriger vers une poursuite d'exploitation. Sur les 4,3 GW restants, la moitié environ seraient démantelés sans nouvelle installation et l'autre moitié faire l'objet d'un repowering.⁹

A côté de ces chiffres de WindEurope, Sibylle Weiler a présenté un graphique de l'Ademe montrant l'évolution des parcs en fin de contrat d'achat et donc du potentiel du marché du démantèlement en France et en Allemagne à l'horizon 2035 :

⁷ Les données pour le repowering ne sont disponibles qu'à partir de 2015.

⁸ WindEurope, Wind energy in Europe in 2018 Trends and statistics ([lien](#), en anglais), Wind energy in Europe in 2019 Trends and statistics ([lien](#), en anglais)

⁹ WindEurope, 2019 ([lien](#), en anglais)

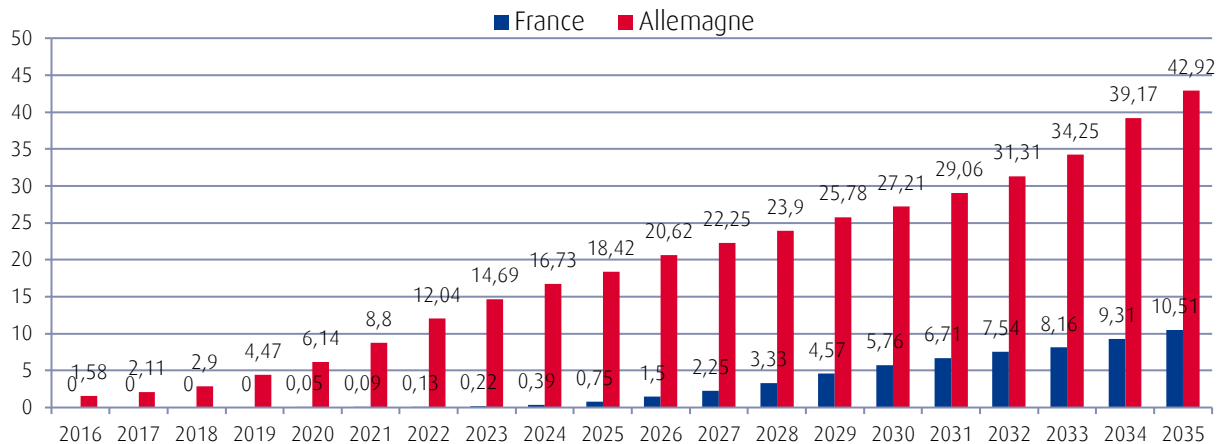


Figure 2 : Évolution du parc arrivant en fin de contrat d'achat et potentiel de marché du démantèlement en France et en Allemagne de 2016 à 2035 (GW cumulés) - Source : Présentation Sibylle Weiler, [Ademe](#) (2017), Représentation OFATE

I.2. Impact des réglementations nationales existantes en Europe sur la gestion de fin de vie des éoliennes

Félix Gorintin a montré dans sa présentation comment les cadres réglementaires nationaux influencent la situation des parcs éoliens en sortie de contrat d'achat en Europe. Pour la période de sortie de contrat d'achat des projets, quatre possibilités s'offrent aux exploitants :

- Démantèlement à la fin du contrat d'achat
- Démantèlement immédiat + Repowering sur le même terrain
- Poursuite d'exploitation du parc hors soutien puis démantèlement
- Poursuite d'exploitation du parc hors soutien puis démantèlement + Repowering

Le cadre réglementaire peut influencer le choix des exploitants. Félix Gorintin a recensé les pays qui disposent d'un cadre réglementaire répondant aux différentes options présentées :

Poursuite d'exploitation :

Seuls huit pays reconnaissent dans leur législation la poursuite d'exploitation (la Belgique, le Danemark, la Finlande, la Grèce, la Hongrie, l'Italie, les Pays-Bas et la Suède). L'Italie propose même une extension du tarif d'achat pour 7 ans à l'issue des 15 ans de contrat d'achat, avec une diminution assez importante du tarif année après année. En Allemagne et au Danemark, à la fin du contrat d'achat, il existe une obligation d'inspection des éléments structurels de la machine et des pales (au Danemark tous les trois ans) qui peut influencer cette décision de poursuite d'exploitation.

Repowering :

Dans six pays d'Europe (Allemagne, Belgique, Finlande, Grèce, Italie, Suède), une législation sur le repowering est en vigueur. En France, la loi sur les autorisations de 2009 rend difficile le repowering pour certains projets anciens. Selon Felix Gorintin, une majorité des parcs installés avant 2015 ont une ou plusieurs contraintes pour opérer un renouvellement et auraient donc tendance à se diriger vers un renouvellement limité en hauteur ou à l'identique, voire un démantèlement simple. En France, une circulaire en 2018 a précisé les conditions du repowering, mais n'est pas encore entrée dans la loi.¹⁰

¹⁰ Il s'agissait juste d'une recommandation pour les services décentralisés du ministère en charge de l'énergie.

Démantèlement :

Dans six pays d'Europe, il existe une réglementation générale relative au démantèlement des éoliennes et pour le retrait des fondations de 1 à 3 mètres (Allemagne, Autriche, Belgique, France, Italie, Portugal). Dans quatre autres pays, les exigences du démantèlement sont définies directement projet par projet dans l'étude d'impact ou par les autorités locales responsables (Danemark, Espagne, Grèce, Royaume-Uni). Selon les législations, il existe une garantie financière ou un fond pour le démantèlement. En Belgique, par exemple, la garantie s'élevait auparavant à 80 000€ par turbine mais est désormais fixée au cas par cas. C'est aujourd'hui le système le plus fréquent en Europe.

II. Cadre réglementaire du démantèlement et du recyclage des éoliennes en France et en Allemagne

II.1. Cadre juridique européen du recyclage des éoliennes

L'urbanisme est une compétence qui relève des États membres, l'Union européenne ne dispose donc pas de règles spécifiques relatives au démantèlement des éoliennes. Les cadres réglementaires du démantèlement propres à la France et l'Allemagne sont décrits en partie II.2 et II.3.

Le cadre européen du recyclage des éoliennes est quant à lui encore faiblement développé, comme l'a souligné Sibylle Weiler (Bird & Bird) dans sa présentation. Les normes générales importantes relatives au traitement des déchets se trouvent dans la Directive-cadre sur les déchets de 2008 ([directive 2008/98/CE](#)) qui définit à l'article 4 l'ordre des priorités dans le domaine de la prévention et de la gestion des déchets.

Selon cette hiérarchie, représentée ci-après sous forme de pyramide, la première priorité est la prévention des déchets. L'objectif est ici d'optimiser les matériaux employés en amont ou de prolonger la durée de vie de l'installation. La deuxième priorité porte sur la « seconde vie » des éoliennes, c'est-à-dire leur réutilisation. En troisième position dans l'ordre des priorités vient le recyclage privilégiant le traitement des matières, plutôt que leur valorisation énergétique. Chacune de ces options a été traitée lors de la conférence à travers des projets concrets (voir partie IV). En dernier recours seulement, l'élimination est l'option la moins vertueuse pour l'environnement.

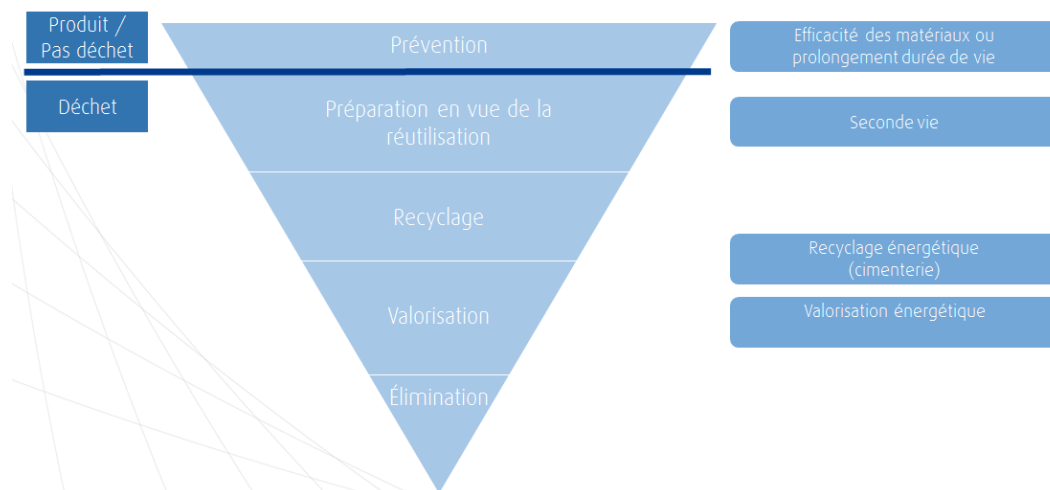


Figure 3 : Représentation de la pyramide des déchets

Sources : Présentation S.Weiler, [Directive 2008/98/CE](#); [KrWG](#); [DepV](#); [Présentation HS Bremen](#) (conférence OFATE, 2019), Représentation OFATE



Cette directive européenne a été transposée dans la [loi allemande sur l'économie circulaire](#) (*Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG*) en Allemagne et dans le [Code de l'environnement](#) en France.

Comme l'a souligné Sébastien Billeau (Ademe), la mise en œuvre des normes européennes sur le recyclage dans les différents États membres reste très différente et l'établissement de normes européennes plus précises serait souhaitable, notamment pour l'image de l'industrie éolienne. Selon lui, l'Allemagne et la France, deux États très importants pour le marché européen de l'énergie éolienne, devraient œuvrer pour aboutir à des réglementations européennes communes.

II.2. Cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en Allemagne

L'Allemagne disposait en 2019 d'environ 54 GW de capacité éolienne terrestre installée.¹¹ À la fin du premier semestre de 2017, une capacité de 1,6 GW aurait déjà été démantelée et fait l'objet d'un repowering¹². Entre 2020 à 2025, plus de 2 GW par an cesseront de bénéficier des tarifs d'achat à l'issue de la durée de soutien fixée à 20 ans.¹³

Cadre réglementaire

Petra Weißhaupt de l'Office fédéral allemand pour l'environnement (*Umweltbundesamt, UBA*) a présenté le cadre réglementaire du démantèlement des éoliennes en Allemagne. Les éoliennes d'une hauteur supérieure à 50 mètres sont soumises à la [loi allemande de protection contre les nuisances environnementales](#) (*Bundesimmissionsschutzgesetz, BImSchG*). L'autorisation selon cette loi rend nécessaire de restaurer l'état d'origine du terrain lors du démontage. Cette loi est complétée par l'article 35, paragraphe 5, alinéa 2 du [Code de la construction](#) (*Baugesetzbuch, BauGB*), qui dispose que l'exploitant est responsable du démantèlement. Selon cet article, l'obtention de l'autorisation est conditionnée à la signature d'une déclaration personnelle d'engagement des opérateurs à démanteler les éoliennes autorisées en fin d'exploitation et à retirer l'imperméabilisation des sols.

Dans le droit ou la jurisprudence de l'urbanisme des Länder, des règles complémentaires et plus précises relatives au démantèlement sont prévues. Presque tous les Länder ont dans leurs codes de l'urbanisme la possibilité d'ordonner la suppression d'une installation. Comme le souligne Petra Weißhaupt, il n'existe cependant pas de véritable standard technique uniforme sur le démantèlement des éoliennes à destination des exploitants ou des entreprises chargées de ce démantèlement.

Une garantie financière de démantèlement, pouvant être saisie en cas de faillite, doit être mobilisée par l'exploitant avant le début du chantier. Il n'existe pas de formule de calcul national pour cette garantie financière mais différentes formules de calcul selon les Länder. En Rhénanie-du-Nord-Westphalie, la garantie financière représente 6,5% des coûts d'investissement¹⁴. Dans le Schleswig-Holstein, il s'agit de 10% des coûts de construction ou 4% des coûts de fabrication.¹⁵ Pour la Hesse, la hauteur de moyeu de l'éolienne est multipliée par 1 000 €. ¹⁶ La formule

¹¹ Windguard, Statut du développement éolien terrestre en Allemagne, année 2019 ([lien](#), en allemand)

¹² Deutsche WindGuard 2017, Perspektiven für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 2020, p. 30, ([lien](#), en allemand).

¹³ Gestionnaires de réseaux de transport allemands (Deutsche Übertragungsnetzbetreiber) 2018, EEG-Anlagenstammdaten zur Jahresabrechnung 2017, ([lien](#) vers les données, en allemand)

¹⁴ Ministerialblatt NRW 2018, art. 5.2.2.4

¹⁵ Parlement du Schleswig-Holstein 2012, imprimé 17/2482, question relative aux cautions de remise en état des chantiers éoliens, p. 1, ([lien](#), en allemand).

¹⁶ 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)

préconisée par le Tribunal administratif fédéral¹⁷ ainsi que par le Land de Saxe-Anhalt est de 30 000 € par mégawatt de puissance électrique installée.¹⁸

Dans le cadre de son projet WEAcycle, l'UBA a analysé les modèles de provisions financières pour le démantèlement de la Hesse (1 000 € x hauteur de moyeu) et du Tribunal administratif fédéral (30 000 € x MW installés) au regard d'une estimation de l'évolution des coûts de démantèlement dans le temps :

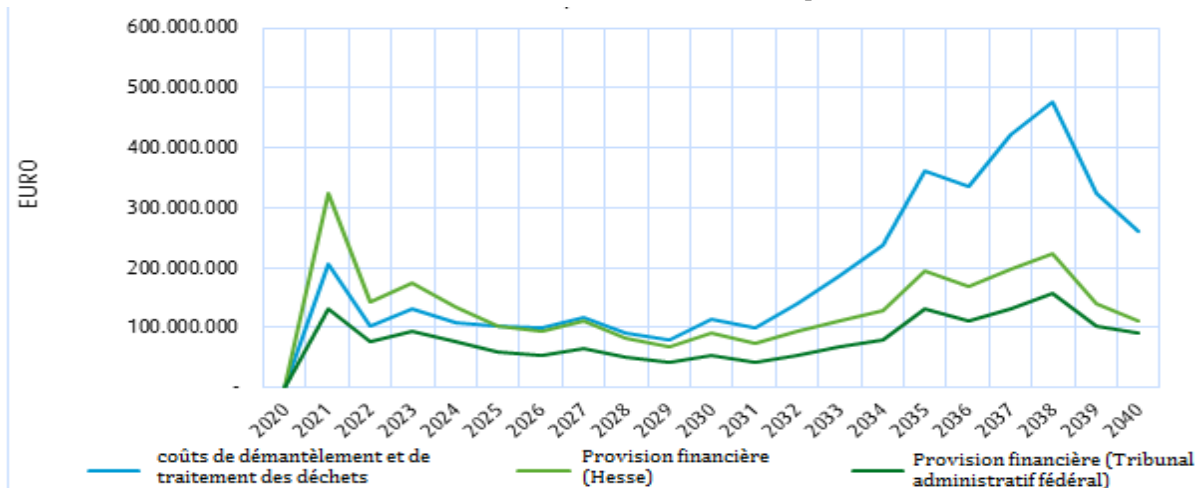


Figure 4 : Estimation de l'évolution des coûts annuels de démantèlement et de traitement des déchets en Allemagne par rapport aux modèles de provisions financières préconisés par la Hesse et le Tribunal administratif fédéral

Source : Présentation Petra Weißhaupt, [UBA 2019](#)

En 2021, de nombreuses éoliennes issues de la loi EEG 2000 vont être démantelées et les coûts de démantèlement et de traitement des déchets devraient osciller autour de 300 millions d'euros. De 2022 à 2031, selon l'UBA, ils fluctuent autour de 100 millions d'euros, puis connaissent à partir de 2031, une forte hausse en raison de l'augmentation de la hauteur de mat des éoliennes installées à partir de 2011. En raison de la diminution du nombre de nouvelles installations à partir de 2018, les coûts de démantèlement et de traitement des déchets devraient baisser en conséquence à partir de 2038.

La comparaison entre les coûts de démantèlement et de traitement des déchets prévus en Allemagne et les provisions financières issues des deux modèles de calcul révèlent d'importants écarts. Dans le modèle de la Hesse de 2021 à 2025, les provisions financières sont encore supérieures aux coûts prévisionnels de démantèlement et de traitement des déchets. Pour le modèle de la Cour administrative fédérale, de 2020 à 2040, les provisions financières restent toujours inférieures aux coûts prévisionnels de démantèlement. Entre 2026 et 2040, les provisions financières ne suffisent plus dans les deux modèles à couvrir les coûts de démantèlement et de traitement des déchets.¹⁹

Pour le cadre relatif au recyclage des éoliennes, la directive européenne a été transposée dans la [loi allemande sur l'économie circulaire](#) (*Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG*) en Allemagne :

¹⁷ Tribunal administratif fédéral (*Bundesverwaltungsgericht, BVerwG*), Décision du 17.10.2012 - 4 C 5.11 ([lien](#), en allemand)

¹⁸ 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).

¹⁹ Pour plus de détails sur ce graphique, consultez la traduction de l'OFATE en français du rapport final de l'UBA sur un démantèlement des éoliennes économe en ressources ([lien](#))



- L'article 6 décrit la pyramide des déchets (voir I.2.) L'objectif de cet article est de réduire au maximum les volumes de déchets produits.
- L'article 7 porte sur une réutilisation non dangereuse, sur une manipulation sûre des matériaux de travail polluants.

Perspectives d'évolution du cadre réglementaire

Après avoir présenté le cadre réglementaire actuel du démantèlement et recyclage des éoliennes en Allemagne, Petra Weißhaupt a exposé le projet WEAcycle de l'UBA pour lequel Ramboll, société spécialisée en conseil et ingénierie, a été mandatée²⁰. Dans le cadre de ce projet de deux ans, les flux de matériaux et les coûts de démantèlement éoliens ont été analysés jusqu'en 2040. Le rapport formule les propositions suivantes pour une amélioration du cadre réglementaire en vue d'un démantèlement des éoliennes durable et économe en ressources :

- Élaboration de lignes directrices techniques pour le démantèlement et le recyclage dans le cadre du groupe de travail entre l'échelon fédéral (Bund) et les États (Länder) ([Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, LAGA](#))²¹ ;
- Développement de standards opérationnels sur les procédés et sur l'étendue du démantèlement des différents composants de l'éolienne ;
- Échange d'informations standardisées avec les turbiniers sur les installations (hauteur de la tour, poids de la nacelle et du rotor) pour simplifier la réalisation des projets de démantèlement. Comme l'a observé Jens Monsees (Wörmann Team) lors de la conférence, au cours des projets de démantèlements réalisés, dans 70% des cas, son équipe ne disposait pas de toute la documentation nécessaire pour démanteler le projet ;
- Réévaluation du système de garantie financière

Petra Weißhaupt a évoqué en conclusion l'initiative issue de l'industrie d'élaboration d'une norme pour le démantèlement (DIN SPEC 4866). Sa publication était prévue pour 2020 au moment de la conférence. Jens Monsees qui fait partie de cette initiative, lancée par RDR Wind, une association d'industriels, a souligné que cette norme visait à permettre un démantèlement opérationnel optimal. Il s'agirait cependant plutôt de recommandations et non d'instructions directes contraignantes. Selon Petra Weißhaupt, si cette norme s'avère efficace, elle pourrait être évaluée, puis entrer dans la réglementation.

Par ailleurs, l'UBA a lancé un projet de recherche sur la question du recyclage des pales du rotor.²² La responsabilité élargie du producteur pour les pales de rotor pourra également y être évoquée. Kerstin Dorenbusch (Enercon) a souligné que l'application de cette norme à l'éolien serait plus compliquée car jusqu'à présent, elle concernerait plutôt des produits ayant une durée de vie très courte contrairement aux éoliennes.

²⁰ Office fédéral allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA), Développement d'un concept et de mesures pour un démantèlement des éoliennes économe en ressources, octobre 2019 ([lien](#), en allemand) [Traduction](#) OFATE.

²¹ Ici, les Länder ont un rôle important à jouer

²² Appel d'offres de l'UBA pour le projet de recherche « Élaboration de normes de démantèlement et de recyclage des pales de rotor », 2020 ([lien](#), en allemand)



Encadré : La **responsabilité élargie du producteur** signifie que « les fabricants et les distributeurs doivent assumer la responsabilité de la gestion des déchets de leurs produits tout au long de leur cycle de vie. » ([BMU 2020](#))

En Allemagne, une responsabilité-produit existe déjà pour les produits suivants :

- Les produits d'emballage : Loi sur les emballages ([Verpackungsgesetz](#), VerpackG, en allemand)
- Les piles ([Batteriegesetz](#), BattG, en allemand)
- Les véhicules ([Altfahrzeug-Verordnung](#), AltfahrzeugG, en allemand)
- Les huiles usagées ([Altölverordnung](#), AltölV, en allemand)
- Les appareils électroniques et électriques ([Elektro- und Elektronikgerätegesetzes](#), ElektroG, en allemand), au sein desquels sont inclus les modules photovoltaïques ([BMU, 2020](#))

II.3. Cadre réglementaire du démantèlement et recyclage des éoliennes en France

Comme l'a rappelé Sibylle Weiler (Bird & Bird), la France disposait de 16,5 GW de capacité éolienne terrestre installée au début de 2020. Il existe pour l'instant peu d'exemples de projets démantelés en France. Le premier projet éolien démantelé en France l'a été en 2010.²³ Jusqu'à fin 2016, les nouveaux projets éoliens bénéficiaient d'un tarif d'achat garanti pour 15 ans. Les premiers projets éoliens commerciaux datant des années 2000, le nombre de projets susceptibles d'être démantelés devrait s'accroître à partir de 2020.²⁴

Cadre réglementaire

Dans sa présentation, Sibylle Weiler s'est penchée sur le cadre réglementaire du démantèlement des éoliennes en France. L'article L 553-3 du [Code de l'environnement](#) dispose que le démantèlement des turbines et la remise en état du site à l'issue de leur durée de vie, quel que soit le motif de cessation d'exploitation, incombe à l'opérateur du projet et, en cas de défaut de celui-ci, à sa société mère. L'obligation de démantèlement prend effet dès qu'un abandon définitif d'utilisation peut être supposé.

L'article R553-1 du Code de l'environnement et l'[arrêté du 26 août 2011](#) prévoient également que l'exploitant constitue une garantie financière de 50 000€ par éolienne, avant le début de la mise en service du parc.²⁵ La garantie financière peut notamment prendre la forme d'une garantie bancaire, une garantie par une assurance ou une consignation auprès de la Caisse des dépôts et consignations. Cette dernière peut être saisie en cas de faillite de l'exploitant à la fin de la durée de vie du projet.

Le Code de l'environnement est complété par l'[arrêté du 26 août 2011](#), qui fixe l'étendue requise du démantèlement en France. Les prescriptions de l'arrêté sont les suivantes :

- Démantèlement du système de raccordement au réseau, démontage des postes de livraison et des câbles ;
- Excavation des fondations et comblement avec des matériaux présentant des caractéristiques comparables :
 - Sur une profondeur minimale de 30 cm lorsque les terrains ne sont pas utilisés pour un usage agricole et que la présence de roche massive s'oppose à des excavations plus profondes,
 - Sur une profondeur minimale de deux mètres pour les terrains à usage forestier,
 - Sur une profondeur minimale d'un mètre dans les autres cas (terrain pour un usage agricole) ;

²³ Ademe : Étude sur la filière éolienne en France, 2017 ([lien](#))

²⁴ Si l'on part du principe que la plupart des projets bénéficient d'une prolongation de cinq ans de leur durée d'exploitation

²⁵ Le montant de la garantie financière est ajusté par l'autorité compétente lors de l'autorisation et de l'installation et par l'exploitant tous les cinq ans sur la base de l'évolution de la TVA et des indices légaux d'évolution des coûts pour le secteur de la construction



- Remise en état des surfaces sur lesquelles la grue est intervenue et des chemins d'accès sur une profondeur de 40 cm et remplacement par des terres ayant des caractéristiques comparables, sauf si le propriétaire foncier souhaite leur maintien en l'état ;
- Valorisation et élimination des déchets de démolition et de démantèlement.

Sur le recyclage, la directive européenne relative aux déchets a été transposée dans le [Code de l'environnement](#) en France.

Perspectives d'évolution du cadre réglementaire

En mai 2019, le Conseil général de l'environnement et du développement durable a publié un rapport, mandaté par le ministre de la Transition écologique et solidaire, intitulé « Économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France »²⁶. Le CGEDD a émis diverses propositions dans ce rapport visant à améliorer le cadre réglementaire du démantèlement des éoliennes en France et notamment :

- Ajouter « à la part fixe actuelle de la garantie financière de 50 000 € par éolienne une part variable proportionnelle notamment à la masse de l'éolienne (éoliennes nouvelles et actuelles, fixation par arrêté) » ;
- Introduire deux nouveaux critères (« efficacité massique et bonus de recyclabilité ») et une analyse du cycle de vie des éoliennes pour les futurs parcs éoliens dans les appels d'offres éolien terrestre de la CRE ;
- Introduire pour les pales des éléments relevant d'une responsabilité élargie du producteur ;

Le cadre réglementaire concernant le démantèlement est actuellement en cours de révision comme l'a évoqué Sibylle Weiler. Les orientations visant à modifier l'arrêté du 26 août 2011 seraient les suivantes, selon l'intervenante :

- Principe de l'excavation totale des fondations. Une exception pourrait être accordée par le préfet si une expertise spécifique démontre que l'excavation totale de la fondation créera un bilan environnemental négatif. Toutefois, une profondeur minimale de deux mètres pour l'excavation devra être respectée (au lieu d'un mètre actuellement) ;
- Réhabilitation des zones de grues et des routes d'accès, sauf si le propriétaire du terrain sur lequel l'installation est située souhaite conserver ces zones et/ou routes ;
- Nouvelle formule de calcul pour la garantie financière

En France, le projet de programmation pluriannuelle de l'énergie prévoit de rendre obligatoire d'ici 2023 « le recyclage des matériaux constitutifs des éoliennes lors de leur démantèlement ».²⁷ Les conditions d'application de cette règle n'ont pas encore été fixées.

²⁶ Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), Économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, mai 2019 ([lien](#)).

²⁷ La clause a été conservée dans le projet final, publié en avril 2020: MTEs, Programmation pluriannuelle de l'énergie, p. 121 ([lien](#))



III. Procédures et coûts de démantèlement

III.1. Le démantèlement dans la pratique

Encadré :

Selon le rapport de l'UBA²⁸, le démantèlement est souvent réalisé en sens inverse du montage. Les différentes étapes sont les suivantes :

- Travaux préparatoires : séparer l'éolienne du réseau électrique, évacuation des fluides de fonctionnement, dangereux pour l'eau, installation de la grue, élaboration de zones de stockage appropriées pour les pièces découpées lors du démantèlement ;
- Démontage de l'étoile du rotor ou démontage une par une des pales ;
- Démontage du moyeu ;
- Démontage de la nacelle incluant le système d'entraînement ;
- Démontage du mat (différenciation selon mat en béton, un mat en acier tubulaire, un mat hybride) ;
- Démontage de la fondation ;
- Déconstruction des aires de stationnement des grues

Les procédés de démantèlement dépendent du type de mat utilisé (en acier, en treillis ou hybride). Différentes techniques peuvent être utilisées pour démonter l'installation. Les techniques de démantèlement à la grue sont recommandées par l'UBA et semblent être plus respectueuses de l'environnement, que le dynamitage ou le démontage de l'installation par chute.

Dans sa présentation, Jens Monsees (Wörmann-Team) a décrit le démantèlement tel qu'il est pratiqué aujourd'hui en Allemagne et ses coûts, sur la base de son expérience de dix ans dans ce secteur. Il a en particulier présenté les détails d'une des plus importantes opérations de repowering en Allemagne, celle du projet de Klettwitz. Le renouvellement visait à remplacer 36 turbines de puissance nominale de 1,65 MW et d'une hauteur de 78 mètres par 19 turbines d'une puissance nominale de 3,3 MW. Le chantier occupait six ouvriers. Les durées des principales étapes du démantèlement du projet ont été présentées :

- Préparation du site de démantèlement : 1,5 jour
- Installation du matériel de chantier : 1 jour
- Démantèlement avec la grue : 2 jours incluant le chargement
- Démantèlement de la fondation : 10 jours (environ 320 m³/turbine) / 4 jours avec dynamitage
- Nettoyage du site : 1 à 2 jours

Dans le cadre du projet présenté, les turbines démontées ont été revendues pour être remontées au Kazakhstan.

III.2. Coûts de démantèlement

Dans sa présentation, Jens Monsees s'est appuyé sur des exemples concrets de coûts de démantèlement. La composition du mât, en acier ou en béton, est la variable principale du coût total. Dans le cas présenté pour un modèle de turbine en particulier²⁹, les coûts sont identiques pour les postes de dépense de la main d'œuvre (16 500 €), de la grue (39 800 €) et du démantèlement de la fondation (31 500 €). En revanche, le démantèlement du mât coûtait 64 700 € dans le cas du béton et rien dans le cas de l'acier. L'autre différence notable portait sur la dépense d'équipement du

²⁸ Office fédéral allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA), Développement d'un concept et de mesures pour un démantèlement des éoliennes économe en ressources, octobre 2019 ([lien](#), en allemand) [Traduction](#) OFATE.

²⁹ Pour plus de détails, consultez la présentation de Jens Monsees sur le site internet de l'OFATE ([lien](#))



site, là-aussi plus onéreuse dans le cas d'un mât en béton (12 500 €) qu'en acier (6 800 €). Le coût total était donc de 165 000 € dans le premier cas contre environ 95 000 € pour le cas de l'acier.

En plus des coûts mentionnés ci-dessus, il faut également prendre en compte les coûts de recyclage et recettes de revente des matériaux, comme le béton issu du mât ou de la fondation ainsi que les matériaux composites issus des pales (fibre de verre ou de carbone). Dans le cas d'un mât en acier, des recettes totales de 15 000 € environ pouvaient être dégagées de la revente des matériaux. Au contraire, des coûts de recyclage pour un total d'environ 35 000 € étaient à attendre dans le cas d'un mât en béton. Aujourd'hui, la majorité des éoliennes installées en Allemagne sont composées de mats en acier.³⁰ La proportion d'installations avec des mats hybrides en béton aurait augmenté de manière notable à partir de 2013-2014.³¹ Les pales et la fondation semblent être les postes de coûts les plus importants, dans le cadre du recyclage des éoliennes. Quoiqu'il arrive, Jens Monsees a indiqué qu'il n'avait encore jamais connu de projet de démantèlement dont son client avait pu tirer des bénéfices nets.

En conclusion, Jens Monsees a identifié les défis actuels et futurs liés au démantèlement. Il n'y aurait pas suffisamment de personnel spécialisé et de grues disponibles pour assurer les prochaines vagues de démantèlement ni assez de capacités de recyclage pour prendre en charge les flux de matériaux attendus prochainement. Actuellement, alors que les volumes à démanteler sont encore modérés, le temps d'attente serait déjà de six à huit semaines pour obtenir une grue. Jens Monsees a également souligné une différence géographique : le recyclage serait plus coûteux au Sud de l'Allemagne qu'au Nord car il y aurait moins d'options à proximité.

³⁰ La proportion de béton augmente souvent avec la hauteur et la puissance de l'installation

³¹ Office fédéral allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA), Développement d'un concept et de mesures pour un démantèlement des éoliennes économe en ressources, octobre 2019 ([lien](#), en allemand) [Traduction](#) OFATE. S.105



IV. Économie circulaire pour la filière éolienne en France et en Allemagne

IV.1. Définition et approche théorique

Encadré :

Selon le Ministère de la Transition écologique et solidaire, l'**économie circulaire** est un « modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources (matières premières, eau, énergie) ainsi que la production des déchets. Il s'agit de rompre avec le modèle de l'économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer, jeter) pour un modèle économique « circulaire » »³²

Dans sa présentation Sébastien Billeau (Ademe) a décrit la perspective d'une économie circulaire en France dans le domaine de l'éolien. Il s'est appuyé sur une étude de 2015 de l'Ademe³³, sur le rapport publié par le CGEDD/CGE³⁴, mais aussi sur l'étude de l'UBA pour l'Allemagne³⁵. Selon Sébastien Billeau, deux conceptions de l'économie circulaire existent : d'une part une économie circulaire temporelle, qui inclue la durée de vie et le cycle de vie du produit, d'autre part, une économie circulaire géographique qui prend en compte le territoire, son organisation géographique et la circulation des flux sur ce territoire.

Il existe également trois types de flux pour qualifier l'économie circulaire :

- Les flux de matières
- Les flux logistiques : transport des matériaux
- Les flux de services, qui dépendent des réseaux d'acteurs présents localement et des compétences

La notion d'économie circulaire recouvre à la fois les installations éoliennes actuellement en service et les nouvelles éoliennes, sous l'angle de l'écoconception des nouvelles turbines. Sébastien Billeau a présenté les défis de l'économie circulaire dans l'éolien à court, moyen et long terme :

- Court-terme : gestion du parc existant
 - « Optimiser les flux logistiques et de services »
 - « Construire des écosystèmes industriels locaux »
- Moyen-terme : parcs en construction actuellement
 - « Améliorer l'efficacité matière et la recyclabilité »
 - Garantir une forme de robustesse des chaînes d'approvisionnement sur les matériaux plus rares
 - Augmenter la durée de vie des installations
- Long-terme : gestion des flux sortants
 - « Optimiser les scénarios de fin de vie »
 - « Créer des industries spécifiques de traitement des déchets et de recyclage »
 - « Traiter les flux sortants dans des écosystèmes industriels locaux »³⁶

Les leviers suivants pour agir sur la circularité de l'économie dans le domaine de l'éolien ont notamment été cités :

- Soutenir l'écoconception et l'innovation : exemple du soutien par l'Ademe du projet Effwind (voir IV.2.1.) ;

³² MTEs, 2019 ([lien](#))

³³ Ademe, Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, Mai 2015 ([lien](#))

³⁴ Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), Économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, mai 2019 ([lien](#)).

³⁵ Office fédéral allemand de l'environnement (*Umweltbundesamt*, UBA), Développement d'un concept et de mesures pour un démantèlement des éoliennes économe en ressources, octobre 2019 ([lien](#), en allemand) [Traduction](#) OFATE.

³⁶ Ademe, Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, Mai 2015 ([lien](#))

- Confirmer les opportunités économiques avec des études environnementales, stratégiques et économiques : exemple de l'étude du CGEDD³⁷ ;
- Faire la promotion de ces opportunités de développement
- Trouver des synergies entre les différents acteurs de la chaîne de valeur (traitement des déchets et recyclage), mais aussi avec d'autres filières : exemple avec la filière des bateaux de plaisance qui est un secteur fortement consommateur en matériaux composites ;
- Inclure des critères de l'économie circulaire dans les mécanismes de soutien nationaux : exemple de la dernière délibération de la CRE évoquant la possibilité d'introduire un critère de « recyclabilité » des pales dans les appels d'offres³⁸.

Sébastien Billeau souligne qu'une approche itérative et donc circulaire existe également pour répondre à l'enjeu de développement d'une économie circulaire. Dans un premier temps, le cadre réglementaire adopté est fortement structurant pour les filières. Il permet d'avoir des garanties environnementales, de créer des standards et les marchés appropriés pour que les acteurs puissent se structurer, se positionner et investir dans l'innovation technique et organisationnelle. Une fois que la filière se structure, le législateur a également une meilleure visibilité sur les pratiques des acteurs (flux de matériaux et flux logistiques par région, méthodes de recyclage). Enfin, cette visibilité peut ensuite permettre de redéfinir et d'améliorer le cadre réglementaire.

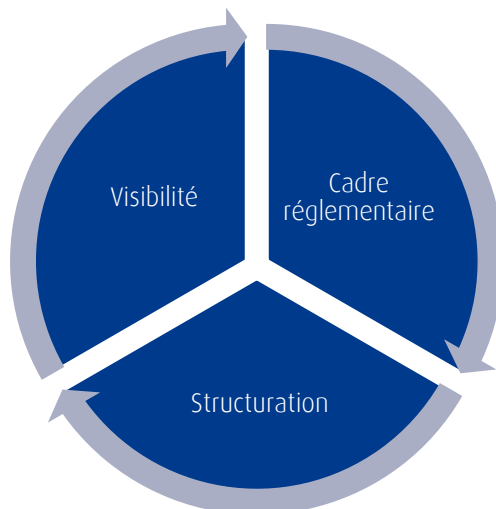


Figure 5 : Approche itérative permettant la mise en place d'une économie circulaire
Source : Présentation Sébastien Billeau, Représentation OFATE

IV.2. Approches innovantes pour une économie circulaire dans la filière éolienne : de la conception au recyclage

Des initiatives innovantes de promotion de l'économie circulaire dans le domaine de l'éolien ont été développées ces dernières années en France et en Allemagne. Certains de ces projets ont été présentés pendant la conférence.

³⁷ Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), Économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, mai 2019 ([lien](#)).

³⁸ Commission de régulation de l'énergie, Délibération n°2019-192, 2019 ([lien](#))



IV.2.1. Conception des matériaux : développement d'une pale en matériaux recyclables

Lors de la conférence, Christophe Magro (CANOE), a présenté le projet Effiwind, visant à développer des pales d'éoliennes en matériaux recyclables. Le Centre technologique Nouvelle-Aquitaine des composites et des matériaux avancés (CANOE) est un centre de recherche, composés d'environ 45 ingénieurs et techniciens, qui travaillent entre autres sur les composites thermoplastiques et les matériaux polymères. Le projet Effiwind, lancé en 2012 et co-financé par l'Ademe et le Conseil régional de Nouvelle-Aquitaine, s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire.

L'objectif était de concevoir une nouvelle génération de pale d'éolienne à partir de nouveaux matériaux entièrement recyclables, à base de résine acrylique thermoplastique, à la différence des pales existantes à base de résines thermodurcissables, en polyester ou époxy. Cette résine thermoplastique, portant le nom d'Elium, est réalisée par Arkema. De nombreuses entreprises (Chomarat, Tensyl, Bostik, Epsilon, Multiplast...) ont été associées au projet.

Après avoir élaboré plusieurs échantillons, deux pales de 25 mètres de long ont été fabriquées. L'une d'entre elles a été testée à l'institut Fraunhofer IWES à Bremerhaven. Des essais en statique et en dynamique équivalents à deux ans de cyclage ont été réalisés, ce qui a abouti à une certification des pales.

Christophe Magro a présenté les résultats et les avantages apportés par cette nouvelle résine liquide acrylique sur le plan technique :

- Procédé d'infusion similaire à celui d'un procédé standard pour une résine époxy
- Durabilité : de meilleurs comportements à la fatigue ont été observés
- Capacité à souder : possibilité d'assembler deux pièces composites au moyen d'un soudage
- Réparation plus aisée par rapport aux pales thermodurcissables
- Consommation d'énergie plus faible : pas de recours à des moules chauffant par rapport aux résines thermodurcissables.
- Augmentation de la productivité d'énergie grâce à une pale plus longue: 10 à 15% d'amélioration de productivité estimée
- Recyclabilité complète de la pale
- Critères environnementaux positifs : absence de bisphénol A, de styrène et de catalyseurs

Comme le souligne Christophe Magro, la prochaine étape du projet est de confirmer les résultats par des tests en situation réelle sur une éolienne. Sur le recyclage, CANOE travaille actuellement sur plusieurs voies comme la dépolymérisation (procédé de séparation entre résines et fibres et réutilisation de la résine recyclée) et la dissolution.

IV.2.2. Une « seconde vie » pour les éoliennes

Comme l'a souligné Félix Gorintin (Innosea LOC) au cours de la matinée (voir I) en se basant sur les chiffres de Windeurope, la plupart des projets arrivant en fin de mécanisme de soutien dans les prochaines années devraient se diriger vers une poursuite d'exploitation. C'est également ce qu'observe le syndicat allemand de l'éolien BWE.

L'allongement de la durée de vie des éoliennes peut également être atteint par la revente des éoliennes ou de certains composants pour une réutilisation dans le cadre de nouveaux projets de parcs éoliens ailleurs dans le monde. Pour atteindre cet objectif, des plateformes de revente mettent en relation les exploitants de parcs éoliens en fin de vie et les potentiels acheteurs.

Bernd Weidmann (wind-turbine.com) a présenté, lors de la conférence, sa plateforme internationale de revente d'installations éoliennes. Wind-Turbine.com compte 25 000 visiteurs par mois provenant de 190 pays. Selon lui, il y aurait des acheteurs partout dans le monde, avec un intérêt plus marqué en Europe, comme le montre la carte ci-dessous :



Figure 6 : Répartition dans le monde des acheteurs d'éoliennes usagées
Source : Présentation Bernd Weidmann

Bernd Weidmann a présenté les tendances du marché de « seconde vie » des éoliennes. Selon lui, il y aurait actuellement un intérêt grandissant pour le marché des pièces de rechange et pour les plus grandes installations éoliennes. En outre, le prix des installations d'occasion a très fortement diminué, en raison du très grand nombre de ces installations arrivant sur le marché de « seconde main ». Autrefois, il était par exemple possible de vendre une installation V80 pour 500 000 €. Aujourd'hui, le prix s'élève plutôt à 100 000€, en raison de l'augmentation du nombre de ces installations sur le marché de revente.

IV.2.3. Recyclage des éoliennes

Analyse des volumes de matériaux à recycler

À partir de 2020-2025 les flux de matériaux à recycler vont devenir croissants en France et en Allemagne. Sébastien Billeau a présenté les flux de matière issus des parcs éoliens démantelés et prévus en France à horizon 2036 :

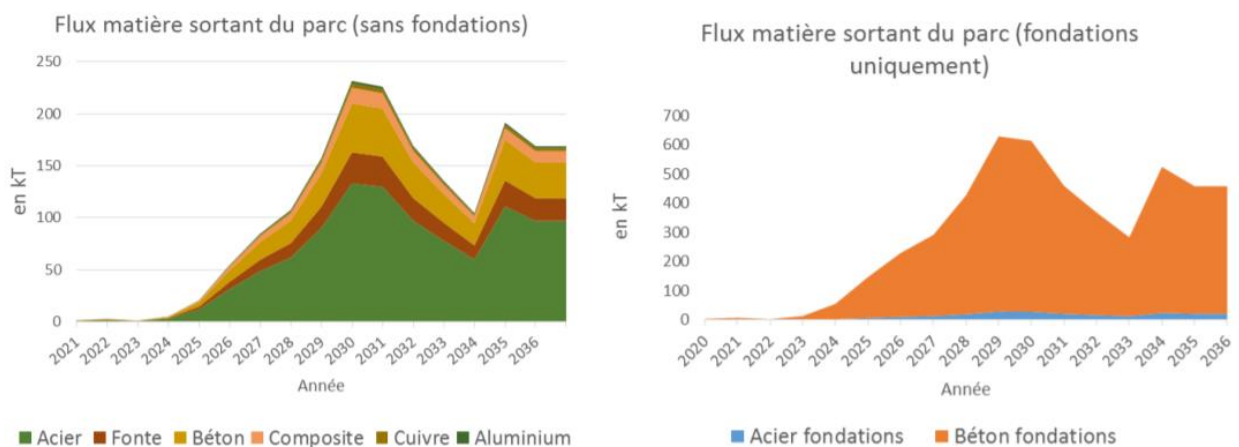


Figure 7 : Flux de matériaux issus du démantèlement des parcs éoliens en France
Source : Présentation Sébastien Billeau, Ademe (2015)



Note: Pour un aperçu des flux de matières sortant du parc éolien en Allemagne, veuillez consulter la [traduction](#) de l'étude de l'UBA « **Développement d'un concept et de mesures pour un démantèlement des éoliennes économe en ressources** » sur notre site internet.

Selon Wolfram Axthelm (BWE) et Kerstin Dorenbusch (Enercon), 90% de la masse d'une éolienne est aujourd'hui recyclable et il existerait déjà des voies de recyclage établies pour la majorité des composants des éoliennes, notamment pour le béton et pour l'acier.

Recyclage des matériaux composites : présentation des techniques de valorisation et projets de recherche actuels

Comme l'a rappelé Sébastien Billeau, les matériaux composites représentent environ 5% du poids de l'éolienne. Ils constituent le plus grand défi en termes de recyclage des éoliennes comme l'a souligné Wolfram Axthelm, Pour leur recyclage, des possibilités de valorisation de semi-matériaux existent dans les cimenteries. Les procédés chimiques tels que la pyrolyse ou la solvolysse devront être encore davantage développés, comme l'a indiqué Kerstin Dorenbusch.

Note: En raison de la crise sanitaire liée au Covid-19, la présentation sur « l'état des lieux des techniques de valorisation des matériaux composites présents dans les pales » a été annulée. Pour plus d'information sur ce sujet, veuillez-vous référer à la [note de synthèse](#) de l'OFATE sur le démantèlement et le recyclage des éoliennes ou nous [contacter](#) directement.

Recyclage du béton : présentation du projet « Recycbeton »

Benoist Thomas (Syndicat national du béton prêt à l'emploi) s'est penché dans sa présentation sur le recyclage du béton des éoliennes et le projet Recycbeton, lancé par divers acteurs de la branche.

Aujourd'hui, la plupart des fondations d'éoliennes sont construites en béton. Le volume des fondations dépend de la taille du mat et représente en moyenne de 250 à 600 m³ de béton par éolienne.

Dans les estimations de Benoist Thomas, se basant sur l'hypothèse d'un démantèlement dès la fin du contrat d'achat, ce qui n'est pas toujours le cas en cas de poursuite d'exploitation, un pic de déconstruction est attendu à partir de 2029-2030. Les volumes de béton issus de l'éolien à recycler devraient atteindre 607 milliers de tonnes en 2029 et 713 milliers de tonnes en 2030.

Aujourd'hui, comme le souligne Benoist Thomas, la quasi-totalité des granulats de béton usagés sont réemployés dans la sous-couche routière. Benoist Thomas souligne que le recyclage du béton issu des éoliennes ne représente pas de difficulté majeure. Les parcs éoliens étant implantés dans des zones rurales, il n'existe pas de grandes difficultés à aller chercher ces blocs de béton et les fragmenter. En outre, le gisement éolien constitue un bon gisement pour le recyclage du béton, car il est constitué presque uniquement d'acier et de béton, dont on connaît la formulation. Après avoir été démantelé, le béton est passé dans une cribreuse concasseuse qui va produire des granulats de diamètres différents et des fines sables. En théorie, ces sables pourraient être réutilisés dans le four des cimenteries comme constituant du ciment ou comme addition dans du béton, mais ce n'est pas autorisé aujourd'hui.

De 2012 à 2017, un projet national de recherche et développement, le projet [Recycbeton](#), financé à hauteur de 5 millions d'euros et animé par le ministère français de l'écologie sociale et solidaire (MTES) a été mené en France pour promouvoir la recyclabilité du béton. Les nombreuses recherches qui ont été menées par divers acteurs du monde de l'industrie et de la recherche ont abouti à la publication d'une quarantaine de documents. Ce projet national s'est appuyé sur un certain nombre d'expérimentations sur différents projets de construction. Une



passerelle à vélo a notamment été construite en 2014 dans un contournement de la voirie Nîmes-Montpellier. Pour ce projet, 20% de graves ont été utilisés. L'observation réalisée sur cette passerelle jusqu'à présent montre qu'il n'y a eu aucun dommage particulier et que le béton se comporte normalement. Sur tous les autres projets, aucune anomalie particulière n'a été constatée. Ce type de projet fait l'objet d'un suivi technique attentif.

Benoist Thomas a estimé qu'il faudrait que la législation évolue aujourd'hui pour permettre le recyclage du « béton dans le béton », et notamment dans le domaine de l'éolien. La norme européenne N206, complétée en France d'une annexe nationale, autorise aujourd'hui à utiliser 20% de granulats recyclés dans les ouvrages. Pour aller au-delà, il est nécessaire de réaliser des études et des tests avant tout coulage. Fin 2020, la norme « granulat rénové » est attendue en France. Cette dernière rendra désormais possible une utilisation dans la construction de mix de granulats recyclés et neufs.

Pour aller plus loin, consultez notre site internet :

- Note de synthèse : Le démantèlement des éoliennes en France et en Allemagne : principes techniques, cadre réglementaire et concepts de recyclage ([lien](#))
- Traduction française : Rapport final de l'UBA sur un démantèlement des éoliennes économe en ressources en Allemagne ([lien](#))
- Webinaire : Démantèlement des éoliennes en Allemagne, en partenariat avec la GTAI ([lien](#))