



Démantèlement des éoliennes terrestres en France: Contraintes et perspectives

Dernière mise à jour : 7 janv. 2021

Publié pour la première fois sur www.energeverite.com le 14 novembre 2020

Démantèlement des aérogénérateurs terrestres
en France
Coûts, contraintes et perspectives

Version 2 - décembre 2020

Jacques Ricour, Ingénieur géologue ENSGN (ex BRGM),
et
Jean-Louis Rémouit, Ingénieur agronome ENSAR
Membres de l'association de Haute-Marne CDC52 et du collectif Énergie et Vérité

1 Introduction

Le coût de démantèlement des aérogénérateurs est un sujet de débat infini entre les tenants de la garantie financière[1] de 50 000 euros exigés lors de l'autorisation d'exploiter et les tenants d'un réalisme s'appuyant sur un devis de démolition CARDEM de 450 000 euros pour éliminer un aérogénérateur et ses fondations.

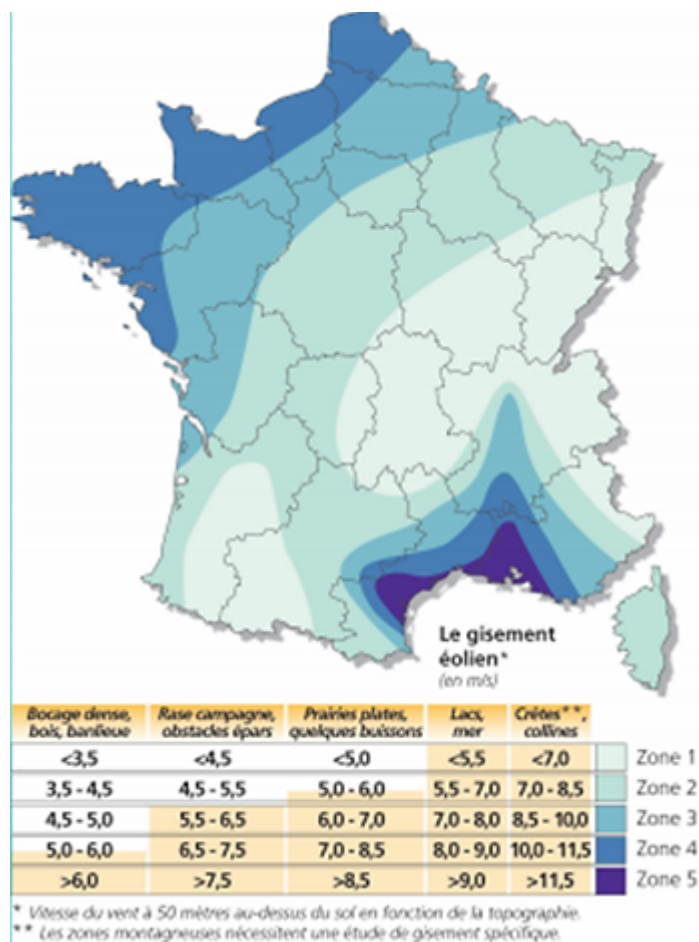
En l'absence actuelle de filière de recyclage du fait de la faiblesse de ce marché naissant, les coûts réels sont certainement plus proches du devis CARDEM que de 50 000 euros de garantie.

Mais d'ici quelques années, comme nous le montrons dans nos tableaux, des candidats au démantèlement vont apparaître pour une nouvelle manne financière[2] adossée à l'idée que les promoteurs voudront se montrer irréprochables même s'ils n'ont rien provisionné dans leurs comptes.

Il n'en reste pas moins qu'en régime de croisière, la revente des produits recyclés ne rapportera que des sommes marginales dans les conditions actuelles du marché du recyclage : c'est ce que nous montrons ici. Les coûts de démantèlement que nous chiffrons en détail dépendent en outre de nombreuses hypothèses et sont loin des 50 000 euros affichés tant par l'État que par les industriels.

2 Données de Base

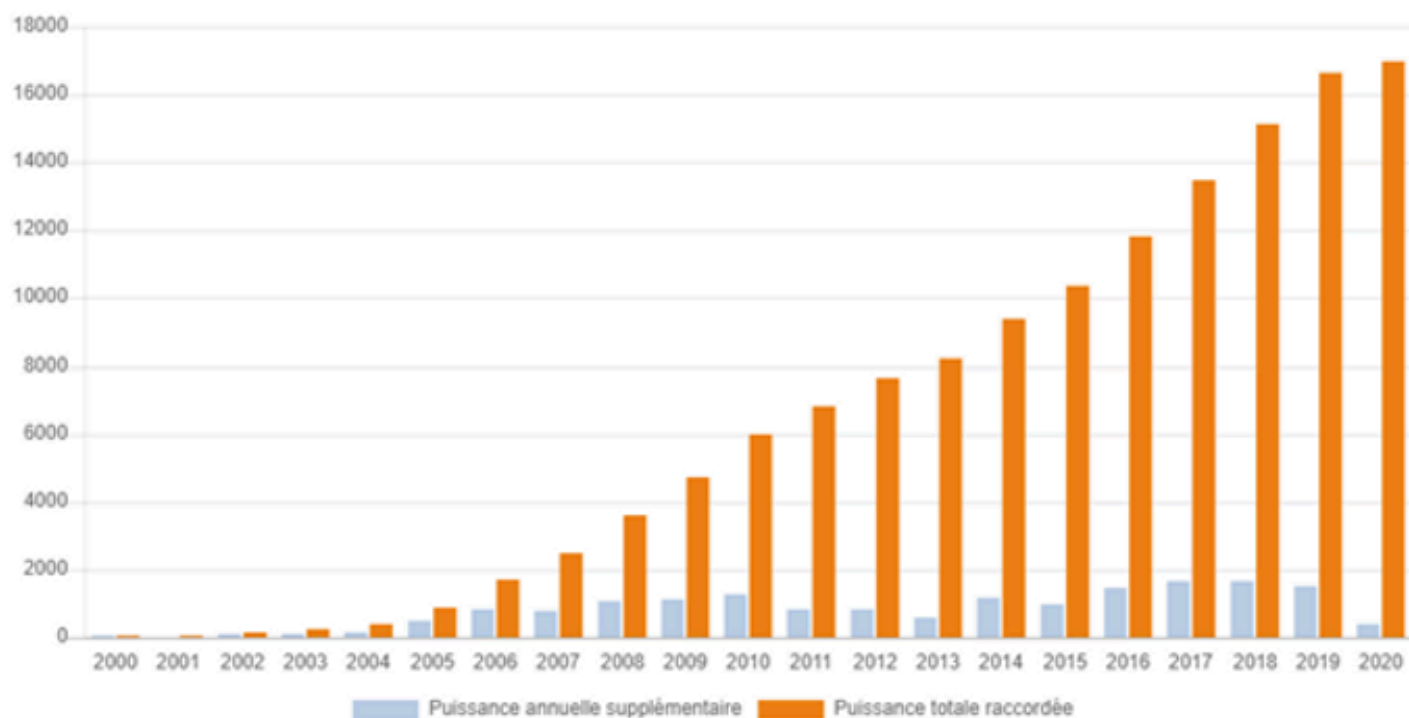
Les données utilisées pour apprécier le marché du démantèlement (=déconstruction + traitement des produits de démolition) des aérogénérateurs terrestres sont reprises ci-après :



Source : *guide_enr_eolien.pdf*

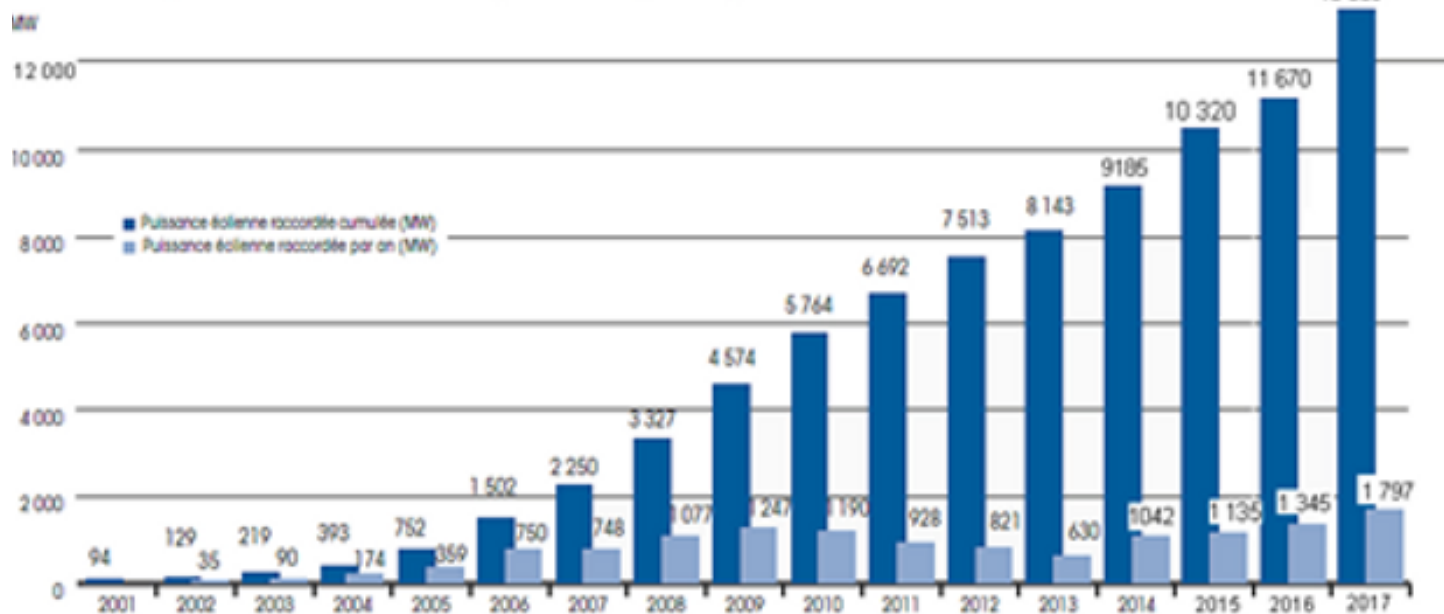
La puissance raccordée était de 16 998 MW en juin 2020. On notera que la région Grand Est qui présente la ressource d'aérogénérateurs la moins intéressante est une de celles qui fournit une des parts les plus importantes de la puissance raccordée.

Evolution du parc éolien français (en MW)



Source : SDES tableau de bord de l'éolien

Evolution de la puissance éolienne raccordée (France métropolitaine)



Du point de vue de la production 2019 les régions Hauts-de-France et le Grand Est ont assuré environ 50 % de la production française métropolitaine en 2019.

Production d'électricité éolienne par région (GWh)⁶

Région	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Hauts-de-France	955	1 569	1 889	2 474	2 764	3 262	3 643	4 966	4 942	5 774	7 192	9 080
Grand Est	984	1 330	1 819	2 686	3 517	3 688	3 976	5 166	4 938	5 568	6 339	7 675
Occitanie	1 103	1 421	1 757	1 815	2 072	2 197	2 191	2 318	2 575	3 128	3 252	3 751
Centre-Val de Loire	758	961	1 094	1 216	1 560	1 513	1 626	1 928	1 802	1 889	2 043	2 662
Nouvelle-Aquitaine	69	152	220	347	649	714	820	924	924	1 231	1 737	2 031
Pays de la Loire	255	400	602	704	885	983	1 072	1 223	1 262	1 349	1 632	1 968
Bretagne	548	730	906	1 113	1 286	1 406	1 396	1 651	1 479	1 545	1 804	1 939
Normandie	301	476	578	829	949	969	1 046	1 260	1 184	1 295	1 518	1 775
Bourgogne-Franche-Comté	64	119	141	154	271	288	374	695	779	1 102	1 311	1 769
Auvergne-Rhône-Alpes	404	559	575	606	778	744	764	799	858	1 008	1 082	1 190
Île-de-France	-	-	-	14	54	38	38	53	61	92	121	185
Provence-Alpes-Côte d'Azur	88	110	120	92	116	116	106	105	109	118	100	104
Corse	34	30	27	24	28	21	31	24	33	22	13	9
Total France métropol.	5 563	7 857	9 728	12 075	14 931	15 941	17 085	21 112	20 946	24 122	28 144	34 138

Source RTE

3 Analyse du marché du démantèlement et de ses contraintes :

Le démantèlement d'un parc d'aérogénérateurs est encadré par l'arrêté du 26 août 2011 suivi de l'arrêté du 22 juin 2020 :

31 Les deux arrêtés de 2011

NOR : DEVP1119348A paru au JO n°0198 du 27 août 2011.

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000024507365>

qui définit les conditions d'exploitation d'un parc d'aérogénérateurs dans son article 4 et en particulier les rapports réguliers qui doivent être remis à la préfecture.

et

NOR : DEVP1120019A paru au JO n°0198 du 27 août 2011.

www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2011/8/26//DEVP1120019A/jo/texte

qui définit la garantie financière devant être présentée au préfet avant qu'il donne son autorisation d'exploiter. Cette garantie ne doit pas être confondue avec les provisions pour démantèlement que les propriétaires de parc devraient provisionner chaque année.

32 L'arrêté de 2020

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042056089?r=6yvD2QSE9P>

Nouvelle rédaction des articles 15, 17 à 19, 21 à 25 de l'arrêté du 26 août 2011)

Précisions sur les opérations de démantèlement.

Ces dernières comprennent :

le démantèlement des installations de production, postes de livraison et câbles dans un rayon de 10 m autour des aérogénérateurs

l'excavation de la totalité des fondations jusqu'à la base de leur semelle

La remise en état du site avec le décaissement des aires de grutage et des chemins d'accès sur une profondeur de 40 cm et le remplacement par des terres de caractéristiques comparables aux terres à proximité.

Les déchets de démolition et de démantèlement sont réutilisés, recyclés, valorisés ou à défaut éliminés dans des filières dûment autorisées

- à partir du 1er juillet 2022 : au minimum 90 % de la masse totale des aérogénérateurs démantelés doivent être réutilisés ou recyclés

- à partir du 1er juillet 2022 : au minimum 35 % de la masse des rotors doivent être réutilisés ou recyclés.

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

- après le 1er janvier 2023, 45 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable ;

- après le 1er janvier 2024, 95 % de leur masse totale, tout ou partie des fondations incluses, réutilisable ou recyclable ;

- après le 1er janvier 2025, 55 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable.

33 Interprétation

Le démantèlement (=déconstruction + traitement des produits de démolition) des aérogénérateurs offre des caractéristiques particulières qui méritent d'être soulignées :

-le tonnage annuel de matériaux de démantèlement à partir de 2020/2021 reste faible au regard du marché des déchets en France ; il ne commencera à être significatif qu'à partir de 2026/2027,

-hors fondations, routes d'accès et plate-forme de maintenance, le poids unitaire moyen d'un aérogénérateur de 2 MW peut être évalué à 240 tonnes[3], soit pour 16 998 MW installés en juin 2020, un tonnage proche de 2 millions de tonnes hors fondations dont 7, 5 % de matériaux composites constitutifs des pales à éliminer sur une période 10 ans environ ; le principal tonnage à éliminer est représenté par les fondations qui, à elles seules, peuvent être évaluées à 12, 5 millions de tonnes de béton et à 1 millions de tonnes de ferrailles.

Les pales pèsent 8 % du poids total de l'aérogénérateur

Le parc français comptait 100 000 tonnes de pales en composite en 2014

Le flux de matières composites des pales sortant du parc français atteindra 15 000 tonnes en 2029 (Source ADEME)

-ce **tonnage réduit**, hors fondations, est **dispersé dans l'espace et dans le temps** et concerne des zones rurales qui ne disposent pas, le plus souvent, d'infrastructures de stockage, de traitement ou de recyclage proches (cimenteries, centres d'incinération industriels, centres de tris et valorisation) ; cet élément est une source supplémentaire de coût liés aux transports (qui peut être évalué [4] au prix unitaire 0,70 € HT/tonne kilométrique),

-le démantèlement nécessitera des **moyens mobiles significatifs** pour permettre le recyclage des produits de déconstruction : grues de 400 t et 50 t, pinces coupantes, broyeurs, brise béton ... et faciliter le transport des éléments à recycler vers des filières pertinentes, la mise en dépôt dans des centres de stockage étant la solution de dernier recours,

-les **tonnages sont hétérogènes** en termes de matériaux : béton, acier, matériaux composites, huiles, diélectriques, produits réfrigérants, circuits électriques, aimants, câblages électriques, fonte ...

Ces éléments vont conditionner les moyens à mettre en œuvre pour assurer le démantèlement des aérogénérateurs terrestres ; les aérogénérateurs construits en mer relèvent, en effet, d'une toute autre organisation.

Les conséquences de cet état des lieux sont les suivantes : le marché du démantèlement des aérogénérateurs s'exprime en tonnages, ou flux de matières, que l'on peut évaluer annuellement à partir de la date de construction des parcs et

de leur durée de vie « utile ». Cette durée de vie « utile » est évaluée par les propriétaires d'après leur productivité à l'instant T mais aussi à partir d'un calcul de leur rééquipement par des aérogénérateurs plus puissants (le repowering). Si cette durée de vie nominale est de 20 ans, il ne sera pas rare de remplacer des aérogénérateurs dès 15 ans de production voir 12 ans, ou bien de les prolonger jusqu'à 30 ans en prenant en compte l'usure des pales qui diminue le rendement des installations.

-si l'on se réfère aux données du paragraphe 2 qui fournit l'historique des puissances raccordées entre 2000 et 2020, les flux de matières associées au démantèlement resteront faibles de 2020 à 2025 et ne représentent que 2 % des tonnages des installations raccordées. Ces flux ne pourront être traités de façon optimale et les coûts de démantèlement /traitement/transport dépasseront les gains de valorisation matière ou énergie que l'on peut espérer, notamment pour ce qui concerne les pales qui finiront en centre d'incinération ou en centre de stockage.

-ces flux sont peu attractifs en volume pour les filières professionnelles de démantèlement/recyclage/valorisation compte tenu de leur tonnage limité d'une part, de leur éclatement dans le temps et dans l'espace d'autre part qui génère un différé dans le temps de 5 à 8 ans de l'amortissement des frais fixes des installations de traitement.

-sur la base du graphique des puissances raccordées fourni au paragraphe 2, à l'horizon 2037 ce seront 10 000 aérogénérateurs[5] qui devront être démantelés, avec une charge annuelle de 300 à 500 aérogénérateurs entre 2029 et 2037. Cette variation de charge annuelle n'est pas de nature à faciliter les prévisions d'investissements pour les professionnels de la démolition. Sur la base de trois à quatre semaines de travaux (estimation Cardem et Saint Pierre SAS de Montpellier) par aérogénérateur de 2 MW, ce serait à minima 12 à 36 ateliers de démantèlement mobile fonctionnant 50 semaines/an à deux postes qu'il conviendrait de mobiliser pour parvenir à maîtriser ces travaux.

-la production en zone rurale de produits pondéreux comme les bétons de récupération entrera en compétition avec de produits locaux à faible coût ; ces produits pondéreux ne supporteront pas de coûts de transport qui obérerait un peu plus leur valeur marchande. En outre, l'absence de centre de traitement ou de valorisation dans certains départements comme la Meuse, la Haute-Marne, l'Aisne conduira à des coûts complémentaires de transport qui handicaperont la valorisation matière ou énergie de produits de récupération,

-la dispersion dans l'espace des installations à démanteler conduit à privilégier des ateliers mobiles de démantèlement ; certaines parties constitutives des aérogénérateurs et des installations annexes comme les nacelles devront toutefois être orientées vers des plates-formes industrielles de tri pour valoriser les composants,

4 L'état actuel des filières techniques de démantèlement et valorisation des aérogénérateurs

L'examen des techniques et de leur maturité auxquelles il est nécessaire de faire appel pour le démantèlement des aérogénérateurs montre que la valorisation matières ou énergie des produits de démolition est très loin d'être maîtrisée et reste le plus souvent au stade du pilote industriel.

Les éléments fournis correspondent au tonnage d'un aérogénérateur de 2 MW :

Les trois **pales** représentent 18 à 20 tonnes par aérogénérateur qu'il est indispensable de cisailer et broyer pour en maîtriser le transport. Constituées de fibre de verre et polymère, résine époxy ou polymère fibre de carbone avec résine époxy ou polymère, le broyage peut être source d'émission de CO₂ et de BPA (bisphénol A, perturbateur endocrinien d'après l'ANSES). A ce jour, on ne sait pas valoriser les pales en fibre de verre autrement que par voie de combustion en cimenterie ; l'élimination des pales en centre de stockage de classe 2 correspond à un coût de 60 à 70 € HT/t hors transport après broyage (100 € HT/t) ; à titre de comparaison, l'enfouissement a un coût de 160 € HT/t au Canada. Par ailleurs, le stockage en centre d'entreposage est générateur d'artificialisation définitive des sols. Veolia déjà présent en Allemagne sur ce marché a mis au point une scie industrielle mobile permettant la découpe des pales pour rendre leur transport plus aisé.

La co-incinération en cimenterie de ces matériaux composites peut être à l'origine d'apparition de réaction alcali-

granulats et de la formation d'étringite au détriment de la qualité des produits finis, ce qui nécessite des précautions de préparation à l'entrée des fours.

Les industriels de la cimenterie feront supporter aux producteurs de déchets les coûts de stockage, broyage et conditionnement avant incinération.

La valorisation matière par pyrolyse ou solvolysé fait l'objet de recherches dans un centre de Toulouse sur des matériaux composites de l'aéronautique, proches des composites constitutifs des pales d'aérogénérateurs et de l'industrie nucléaire (thèse de ZHIYA Duan en 2019 sur : « Étude d'un procédé d'élimination de résine époxy par pyrolyse appliquée au dés-enrobage de combustibles nucléaires »). Cette voie de valorisation n'en est qu'au stade du pilote, sans que l'on ait, à ce jour, une idée des coûts et de la faisabilité à l'échelle industrielle. Les fibres de verre pourraient être alors valorisées après broyage comme filler en enrobés de chaussée et les fibres de carbone pourraient être recyclées.

« **Le recyclage est freiné par des coûts de collecte et de traitement élevés** », observe Mathieu Schwander, le responsable du programme smart composite à IPC, le centre de recherche de la plasturgie. Et lorsque recyclage il y a, le downcycling (dégradation de la matière) reste largement privilégié *En l'absence de marché aval, les pales terminent au mieux, valorisées énergétiquement, au pire enfouies en décharge. Dans le premier cas, elles sont déchiquetées et éventuellement broyées avant d'être introduites dans un four de cimenterie en remplacement du mazout. Les broyats peuvent entrer dans la constitution de Combustibles Solides de Récupération (CSR), mais à un coût dissuasif.*

Résultat, les morceaux sont enfouis dans "la majorité des cas", affirme Delphine Garnier, la responsable ingénierie du projet D3R[6]. À l'instar de ce qui se passe dans l'industrie nautique qui utilise, elle aussi, une grande quantité de composites en fibre de verre. "Il n'y a pas encore de filière de valorisation matière", reconnaît Ivana Lazarevic, chargée de mission pour la Fédération des industries nautiques, qui pointe un gisement éparpillé et compte sur l'union des secteurs pour massifier les flux et justifier la création d'une filière de recyclage. » (Source l'Usine Nouvelle, 20 2 2019).

En septembre 2020, face à ce dilemme, un consortium d'industriels (Arkema, Owens Corning, Engie, M Wind Power, Groupe Suez) et de centres techniques se sont regroupés dans le projet ZEBRA (Zero Waste Blande Research) d'une durée de 42 mois piloté par l'IRT (Institut de Recherches Technologiques) Jules Vernes de Nantes pour concevoir des pales recyclables à 100 % en acrylate qui peut être recyclé par dépolymérisation. Cet aveu de faiblesse et ce projet ne règle pas le problème des installations mises en place jusqu'en 2024 -2025

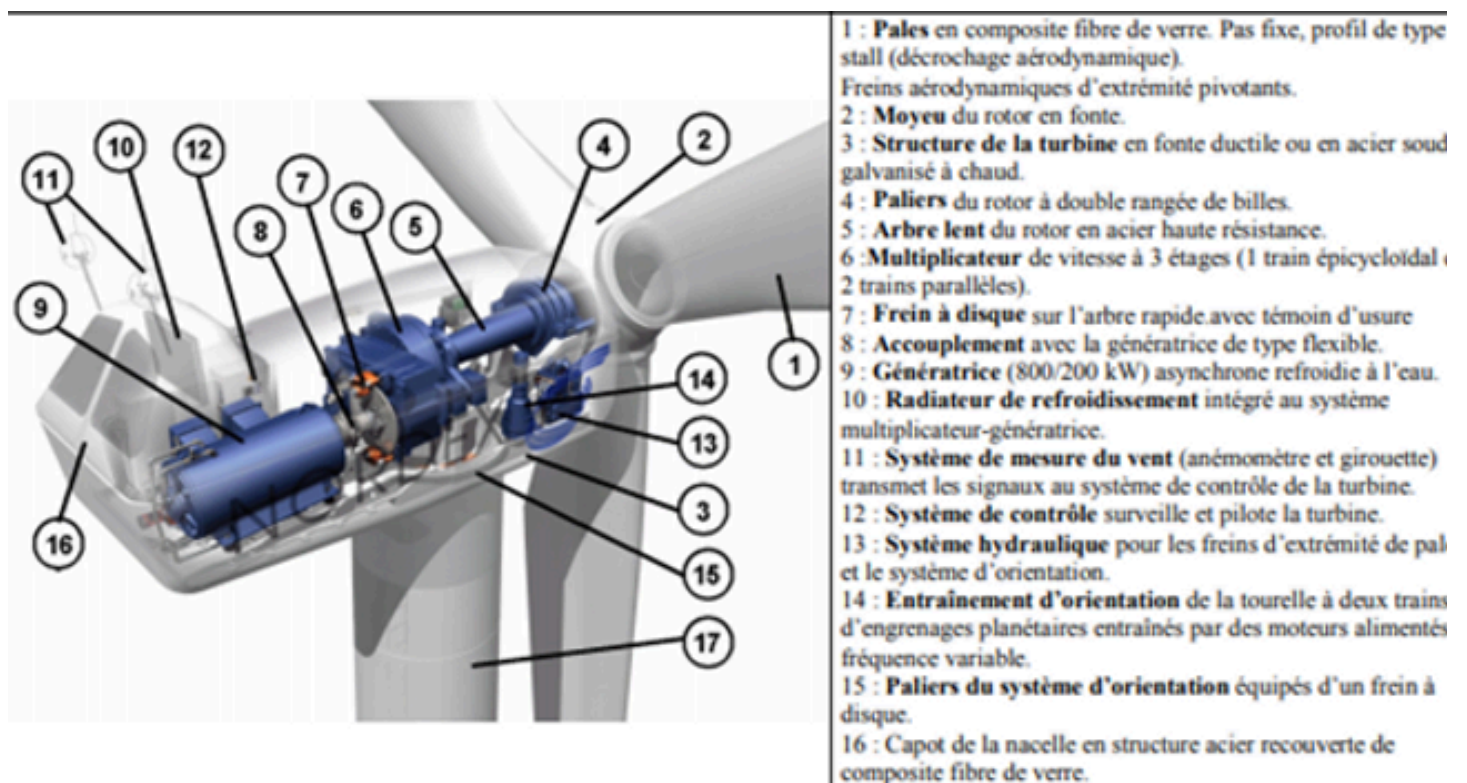
Les **aimants** constitués notamment de bore et de terres rares dont le néodyme, ne sont pas recyclables en l'état des techniques mobilisables. Une unité du CEA à Grenoble mène des recherches sur un pilote industriel et parvient aujourd'hui à un niveau de recyclage de 20 %. ITACHI mène des recherches au Japon sur ce sujet depuis 2017 avec le METI, le BRGM avec le projet Extrade qui touche le recyclage de l'ensemble des terres rares. A ce jour en l'absence de filière mature de recyclage, le stockage en centre dédié de classe 2, voire de classe 1, représente un coût de 120 € HT/t hors transport. Par ailleurs, il convient de souligner la grande hétérogénéité des technologies utilisées par les constructeurs ; d'après Bernard Deboyser, ingénieur consultant, et le SER (Syndicat des Énergies Renouvelables), seules 10 % des installations auraient recours aux terres rares. L'évolution des technologies s'appuyant sur des matériaux supraconducteurs permettra très vraisemblablement de ne plus utiliser ces éléments dans les nouvelles générations d'aérogénérateurs terrestres. En l'état, on ne peut que constater une très grande hétérogénéité des installations en place qui ne facilitera pas le traitement des matériaux lors du démantèlement.

Le **mat** constitué d'aciers spéciaux boulonnés ou assemblés par manchons représente environ 145 tonnes. La valorisation de ces matériaux après découpe ne pose pas de problèmes particuliers, à un prix moyen d'environ 420 € HT/t hors coût hors transport. A souligner que les prix de vente fluctuent en fonction des cours du marché qui est dominé par les fonderies électriques de deuxième fusion italiennes. Les mats en béton (technique Enercon) sont valorisables après concassage sur le marché local. Leur faible valeur marchand interdit tout transport au-delà 20 à 30 km.

Les **fluides techniques** sont représentés par 1000 litres d'huiles minérales et 600 kg de liquides diélectriques constitués

d'esters de synthèse (isolation des transformateurs dans les armoires électriques) ou produits de refroidissement des organes chauffants. Après récupération, ils peuvent être régénérés en centre de traitement spécialisé avec un coût de collecte à 80 € HT /t + traitement de 70 € HT/t.

La **nacelle** y compris système d'orientation avec moteur (frein, rotor, générateur-convertisseur, refroidisseurs, régulation électrique, arbre primaire et secondaire, multiplicateur) d'un poids de 70 tonnes, le moyeu de commande du rotor (20 tonnes), et l'armoire de couplage au réseau électrique sont d'abord vidangées des fluides techniques et pièces annexes (batteries) ; puis ces éléments sont démontés et dirigés vers une plate-forme technique pour être désossés avant que les différents éléments métalliques ou organiques soient recyclés. Après tri, les éléments non recyclables seront orientés vers un centre de stockage de classe 2 à un coût de 65 à 120 € HT/t hors transport. Certains éléments après récupération et révision peuvent faire l'objet d'un deuxième usage sur le marché de seconde main (www.windturbinescout.com). Ce dernier point ne concerne pas les pales soumises à des champs de contraintes et d'usure régulières à terre mais aussi en mer (Dong Energie, groupe danois, a dû procéder à la réparation et à la modernisation de 273 pales du champ offshore Horns Rev 2 en 2015, cinq ans après son inauguration du fait de l'érosion liée au mélange eau-sel-sable-glace). On peut s'interroger sur l'innocuité des microparticules liées à cette usure !



Chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'un aérogénérateur Nordex N60 (1300 kW)

(Source : État de l'art des aérogénérateurs Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphane Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nikita -24 2 2012)

Les **fondations** d'un volume de 600 m³ constituées de béton et de fer à béton sont démantelées au brise-béton, le béton broyé pour recyclage et les ferrailles recyclées dans des fonderies de deuxième fusion. La faible valeur de ces éléments pondéreux grevée par les prix de transport ne peut couvrir les coûts du démantèlement et de la réhabilitation du site notamment d'obturation de la fouille à l'aide de matériau meuble en respectant les contraintes liées à la protection des eaux souterraines.

5 Synthèse de la valorisation des sous-produits d'un aérogénérateur en 2020.

5-1° Valorisation brute du béton du mât et des fondations : recettes 0 euros

Il n'y a pas de filière de valorisation du béton avec des coûts de transport des pondéreux à 0,70 € la tonne-kilomètre. La seule possibilité économiquement raisonnable en dehors du stockage en remblais en carrière serait d'intégrer l'obligation d'utiliser systématiquement des matériaux recyclés de deuxième génération pour les travaux publics dans les cahiers des charges des appels d'offre.

5-2° Valorisation brute des ferrailles : recettes 28 600 euros

Les fonderies de seconde fusion (fonte ou acier) en France sont dispersées et s'approvisionnent sur le marché de seconde main ; les fonderies électriques plus souples d'utilisation, se trouvent concentrées en Italie du Nord et en Espagne. Le prix d'achat de ces ferrailles par les fondeurs varie de 110 € à 400 €/tonne. Leur prix de transport est de 0,70 €/tonne-kilomètre. Il n'est pas difficile de comprendre que le transport pénalise le produit de la vente. Néanmoins, en acceptant la présence d'un fondeur à proximité on peut calculer le produit de la vente des aciers et fontes provenant de l'ensemble nacelle, mat et socle sur la base des prix 2020 : 260 tonnes par aérogénérateur à 110 euros HT la tonne

5-3° Valorisation brute des turbines : recettes 17 300 euros

La partie des turbines et le câblage représente en gros 70 tonnes. Il faut les désosser et séparer les parties aimantes, cage, bobinage, engrenage et armatures métalliques.

Source : https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-peolienmer-pdlit/quelles-sont-caracteristiques-techniques-eoliennes-envisagees.html#:~:text=La%20longueur%20approximative%20des%20c%C3%A2bles,d'environ%206%20400%20kg_

Le cuivre (6,4 tonnes) peut être revendu sur les marchés 2,70 €/kg, car il doit être retraité soit 17 300 €. C'est le seul revenu admissible du recyclage.

La partie aimants, lorsqu'il ne s'agit pas de bobines est constituée d'aimants qui peuvent contenir des terres rares de la série des lanthanides. On ne dispose pas de solution de recyclage efficace à ce jour tant que la filière grenobloise n'est pas opérationnelle[7].

5-4° Valorisation brute des fluides : recette 0 euros

Les fluides comprennent les huiles (500 à 1000 litres), les produits réfrigérants et les esters (remplaçants du PCB) dans les armoires électriques ; les coûts de retraitement pour faciliter le recyclage sont à peine couverts par les prix de revente des produits de deuxième génération qui représentent 80 % des tonnages, 20 % allant vers des centres d'incinération agréées et ce avec des aides de l'ADEME à la collecte par des sociétés agréées et au traitement. Les recettes escomptées sur ce poste sont donc marginales compte tenu des tonnages en jeu

5-5° Valorisation des pales : recettes 0 euros

Les pales (18 tonnes par aérogénérateur) peuvent être mises en décharge (avec un coût) ou incinérées en cimenteries comme combustible de fours (CSR : Combustible secondaire de Récupération- rapport 2008 de l'association RECORD). La nécessité pour les cimentiers de les broyer, de les faire passer par des silos d'homogénéisation et de mettre en place des traitement complexes des effluents gazeux (fumées) ne les encourage pas à acheter ce comburant qui coûtera plus cher que d'autres combustibles CSR pour lesquels les filières sont déjà en place (huiles usées, pneus, résidus de broyage automobile RBA), eu égard aux coûts de transport, traitement, stockage avant utilisation.

6 Conséquences sur le marché du démantèlement des aérogénérateurs terrestres

De ces quelques données factuelles, et de l'aveu même des industriels (présentation de Netwind de 2017), il ressort que le marché de démantèlement des aérogénérateurs ne dispose aujourd'hui ni des filières opérationnelles de recyclage ni des moyens industriels pour répondre à une demande dispersée dans le temps et dans l'espace. Il est clair qu'en l'état des prix de valorisation matières (qui varient très rapidement dans le temps de 100 à 420 €/t pour les ferrailles entre 2002 et 2009) ou énergie, ceux-ci ne couvriront qu'une très faible part des coûts de démantèlement et de stockage des déchets générés ; le stockage contribuera par ailleurs à l'artificialisation des territoires ruraux et le prix d'achat des métaux de deuxième génération ne couvrira au mieux que 200 à 300 km de transport.

La conséquence en est une sous-estimation significative des coûts de démantèlement et des garanties financières associées par les promoteurs et les pro-éoliens.

La prudence veut que l'on retienne, en l'état des connaissances et des marchés, des solutions de démantèlement sécuritaires mais plus coûteuses, au moins durant les premières années d'émergence du marché. Il s'avère par ailleurs urgent de développer des programmes de recherches et pilotes industriels à **charge entière des syndicats professionnels de l'énergie éolienne déjà largement subventionnés (et non des contribuables)** portant sur deux points principaux : recyclage et valorisation des pales, démembrement des turbines visant à valoriser leurs composants, notamment les aimants permanents.

7 Évaluation du coût du démantèlement des aérogénérateurs terrestres.

7-1°-Les tentatives d'évaluation antérieures.

Différents professionnels ou organismes comme la FEE ou l'ADEME se sont penchés sur l'évaluation des coûts de démantèlement des aérogénérateurs terrestres ; les éléments de coûts fournis par les professionnels de l'éolien de concert avec l'ADEME sont en effet, notoirement sous-estimés en utilisant des arguments qui sont en contradiction avec l'analyse qui a été faite dans les paragraphes précédents.

Afin d'éclaircir le débat, les évaluations qui sont fournies ci-dessous tenteront de préciser le périmètre et les conditions du démantèlement pris en compte ramenés au MW installé. En effet, Le poste de la déconstruction des fondations pèse d'un poids important dans l'évaluation des coûts globaux.

En 2008 **Saint Pierre SAS** de Montpellier, entreprise de déconstruction a établi un devis pour l'association Vent de Colère qui correspond à la démolition d'un aérogénérateur de 3MW pour 900 000 € HT, hors démolition des socles en béton, soit **300 000 € HT/MW**. La ferraille récupérable reste à disposition. La durée du chantier est de 6 semaines avec une grue de 700 tonnes et 2 grues de 50 tonnes, une presse cisaille avec une équipe de 5 personnes.

En mars 2014, la société de déconstruction **Cardem** (groupe Vinci) a établi un devis pour démolition à l'explosif d'un aérogénérateur E10 ayant brûlé pour le compte de NORDEX, à l'**exclusion des fondations** mais y compris évacuation et le traitement des matériaux de démolition pour 425 280,65 € HT avec une déduction de 80 462,50 € HT de revente de matériaux € HT, soit un coût final de 344 815,15 € HT pour 2,5 MW et **138 000 € HT /MW**. La durée du chantier est estimée à 7 semaines. L'abattage à l'explosif est difficilement envisageable pour des ouvrages en bonne état de marche compte tenu des risques de contamination des sols et des eaux. Soulignons que la démolition à l'explosif ne peut s'appliquer qu'à des aérogénérateurs avec un fut en béton.

Nos voisins allemands, nettement plus prudents, décrètent, eux, (décision du 4/11/2015 en Rhénanie du Nord-Westphalie) l'obligation d'une provision minimale de 6,5 % du prix total de l'installation, soit 715 000 € pour une machine Enercon E126 de 7,6 MW valant 11 millions d'euros (@rioujeanpierre), soit **94 000 €/MW** que l'on suppose être HT et hors démolition des fondations.

AD3R (Association pour le démantèlement, le recyclage, le reconditionnement et la revente d'aérogénérateurs) réunit sept sociétés dont Giron père et fils recyclage à Reims, G Bruhat à Vitry-le-François et le chef de file, Netwind, structure installée à l'espace Becquerel à Chalons-Sur-Marne ; AD3R réfléchit à un site pilote de démantèlement

d'aérogénérateur. La société de démantèlement et de récupération de ferrailles G Bruhat consultée par téléphone le 7-12- 2020, évalue le coût moyen de démantèlement d'un aérogénérateur de 2 MW à 120 000 € HT dont 20 000 € pour le fut sur la base de la conduite de 4 chantiers d'une durée unitaire de 4 semaines. Les ferrailles sont négociées actuellement sur la base de 120 € Ht/t et la seule voie d'élimination des pales reste, à ce jour la mise en stockage réglementé. A l'heure actuelle, le marché se heurte à l'appel de main d'œuvre étrangère pour parvenir à rentrer dans l'épure des garanties financières qui devraient être révisées et portées à 80 000 €. Ces chantiers méritent des conditions de sécurité particulières pour la protection du personnel.

Dans son audition sous serment du 79 mai 2019 Monsieur Grandidier, président de **Valorem** qui gère 150 à 170 mats en France, devant la Commission Aubert (<http://www.assemblee-nationale.fr/15/cr-cetransene/18-19/c1819023.asp>) concluant **entre 50 et 75000 euros par MW**, soit pour un aérogénérateur de 2,3 MW un coût compris entre 115 k€ et 173 k€.

« J'en arrive au socle en béton des aérogénérateurs. Il est possible de retirer intégralement ces fondations. Nous y avons procédé pour une machine. L'opération est certes plus coûteuse qu'un retrait partiel. Cela étant, le démantèlement d'un parc éolien coûte 50 000 à 75 000 euros par MW, soit 3 % à 5 % du coût de construction » (M. Grandidier, cofondateur de la FEE).

Il n'apparaît pas clairement si le démantèlement des fondations est pris en compte et dans quelles conditions, notamment pour l'obturation de la fouille ni si l'estimation tient compte de la TVA.

7-2° Notre exemple d'évaluation du coût du démantèlement d'un aérogénérateur.

A titre d'exemple, l'évaluation du coût du démantèlement d'un aérogénérateur de 2 MW localisé en Haute-Marne est détaillée ci-après ; celui-ci intègre la destruction des fondations sur 0,80 m, le stockage des pales et des organes de liaison en centre agréé après tri.

Il faut cependant remarquer qu'il ne faut pas confondre le coût de démantèlement par un prestataire spécialisé avec la facture qu'il va produire. L'estimation que nous produisons dans l'exemple est celui d'un prestataire généraliste moyen qui fait office de coordinateur et qui sous-traite la plupart des opérations qui ne sont pas son cœur de métier comme par exemple celles concernant le socle en béton dont nous verrons qu'il représente une grande partie des coûts. La facture ainsi produite se compose ainsi du tableau des coûts directs, du tableau des coûts indirects et enfin du tableau de contribution budgétaire des frais généraux du prestataire.

Enfin, nous n'avons pas intégré, dans cet exemple, les frais de reconditionnement des parties communes du parc d'aérogénérateurs (chemins, aires de grutage, postes de livraison, etc.) au motif que nous considérons que la plupart des parcs seront reconditionnés[8] en raison de l'augmentation de puissance nominale des nouveaux aérogénérateurs, de la pression de l'État pour faire aboutir la PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) et du manque à venir de communes candidates à de nouveaux parcs.

Il manque également, une juste appréciation du coût des deux rôles, souvent confondus dans l'industrie éolienne, celui de maître d'œuvre et celui de maître d'ouvrage.

Tableau des frais directs



Soit un total de remise en état 293 235 € HT, valeur 2019, auquel il faut retrancher la valeur de revente des acier et fonte pour 260 t à 110 €, et du cuivre pour 6,4 tonnes à 2,7 €/kg.

Un démantèlement doit faire l'objet d'un encadrement par un maître d'œuvre afin d'assurer :

- le dossier de déclaration en préfecture.
- La production du plan de recollement en fin de travaux.
- La coordination de l'hygiène et de la sécurité.
- La vérification de l'état des lieux comme par exemple l'absence de pollution des sols et des nappes.

Ces missions donnent lieu à des frais indirects qui se répartissent comme ci-dessous :

- frais généraux de l'entreprise et de garantie bancaire ;

- maîtrise d'œuvre et de rapport de recollement dû à l'administration ;
- contrôle et suivi HSE ;
- constats d'huissier avant et après travaux ;
- aléas et imprévus (transport, évolution réglementaire plus contraignante, évolution des contraintes HSE...).



Le prix de vente de cette prestation aboutit au total HT de 354 835 € arrondis à 350 000 € en base 2019 sur la base des hypothèses prises pour son élaboration dans le département de la Haute-Marne. Elle ne comprend pas la remise en état des parties communes.

En version TTC, cela donne, pour les pouvoirs publics, une somme de 425 802 euros que nous arrondirons ultérieurement à **420 000 euros TTC** par aérogénérateur de 2 MW dans nos calculs ou bien à 210 000 euros TTC par MW.

Les tarifs vont varier à un instant donné sur les possibilités qu'offrent le voisinage géographique en termes de

retraitement et de l'éventuelle concurrence. Présence de filière, évolution des contraintes légales et environnementales, coûts de transport et concurrence sont donc les paramètres de cette équation financière.

On doit considérer les résultats unitaires de ces approches comme assez dispersées dans un rapport de 1 à 6, les bases d'évaluation n'étant comparables ni dans l'espace géographique, ni dans le temps.

7-3° Les coûts cachés.

L'évaluation des coûts de démantèlement d'un aérogénérateur terrestre comprennent pour une part significative la déconstruction des fondations et son comblement par des matériaux de même nature que les terrains environnants, comme déjà souligné.

A ces éléments il faudrait en principe ajouter la réaffectation au prorata du nombre d'aérogénérateurs des frais de remise en état des parkings, aires de maintenance, des routes d'accès et des postes de raccordement au réseau électrique pour le champ d'aérogénérateurs considéré. Il n'en est pas tenu compte dans cette évaluation car il est formulé l'hypothèse qu'aux premières éoliennes seront substituées de nouvelles plus performantes dans le cadre du « repowering » qui réutilisera donc cette même infrastructure si l'autorisation de conserver le poste de livraison ancien est donnée.

Par ailleurs les coûts de démantèlement des aérogénérateurs ne pourront qu'évoluer qu'à la hausse :

- les coûts de déconstruction qui intègrent l'immobilisation de l'équipe et du matériel (engins de chantier détaillés plus haut et base vie) que l'on peut apprécier à 4 à 5 semaines ;

- les coûts associés au transport, au tri-recyclage, valorisation énergie ou matière, le stockage des rebuts des produits de déconstruction et qui sont détaillés ci-après.

Ces coûts ne pourront évoluer qu'à la hausse compte tenu d'une exigence sociétale et réglementaire toujours plus contraignante, notamment du fait du recyclage et de la raréfaction des centres de stockage de déchets et de l'accroissement des taxes environnementales. Cette appréciation est confirmée par l'évolution du marché de la déconstruction de ces deux dernières décennies.

8° Récapitulatif de l'état financier

8-1° Un coût pour une éolienne de 2MW de 420 000€TTC soit 210 000 € TTC/MW.

Les tableaux ci-dessus ont indiqué les coûts associés au démantèlement des aérogénérateurs y compris les fondations sur 0,80 m pour 210 000 €TTC/MW, les gains liés à la valorisation matière ou énergie étant pris en compte en déduction mais avec un manque de maturité du marché, une forte pression des coûts de transport et de coûts matière déprimés liés à la crise actuelle.

Comme déjà souligné ci-dessus, ces coûts ne pourront évoluer qu'à la hausse ce qui viendra contrebalancer les effets de séries liés à la maturité du marché.

8-2° L'insuffisance des garanties financières.

On est loin des garanties demandées par l'État : 50 000 à 65 000 euros lors de l'autorisation d'exploiter conformément aux arrêtés de 2011 et 2020.

Ces garanties financières représentent environ 15 % du coût réel de démantèlement évalué à la date de parution de cette étude à 420 000 euros TTC par installation ce qui apparaît complètement insuffisant.

Elles sont constituées généralement sous la forme d'un compte à la Caisse des Dépôts ou d'une garantie bancaire équivalente. Dans ces deux cas, le plus souvent, la garantie n'apparaît pas au bilan ou en hors bilan.

On doit distinguer clairement ces garanties des provisions que devraient constituer les exploitants de parcs dans leurs comptes en prévision du coût du démantèlement tel qu'il apparaît dans nos calculs. Si l'exploitation de l'aérogénérateur est fixée à 15 ans, son propriétaire devrait provisionner des montants voisins de 28 000 euros par

an et par aérogénérateur de 2MW pour présenter des comptes sincères.

8-3° Approche des marchés et du coût total de démantèlement des parcs en place entre 2021 et 2037.

Sur la base des parcs raccordés annuellement indiqués au chapitre 1 présenté ci-dessus et d'une évaluation unitaire de 210 000 € HT/MW pris dans l'exemple avec les réserves exprimées ci-dessus, nous avons pris en compte la facturation du prestataire et non son prix de revient direct pour définir la volumétrie des marchés annuels de démantèlement. Ce prix au mégawatt est un mixage anticipé, actualisé à 2020, de facteurs de coûts qui vont descendre (les effets quantitatifs de la taille des marchés) et de ceux qui vont monter (les exigences croissantes de la législation en matière de qualité environnementale).

Ce marché du démantèlement des aérogénérateurs actuellement raccordés est résumé ci-après :

Tableau des perspectives de démantèlement des aérogénérateurs
en fin de vie en n+20 et démontables en n+21 (source ch. 1)



Le montant du coût total de démantèlement des 8000 aérogénérateurs en production en 2020 (à partir des années 2000) à démonter avant 2040, ressort à 3,36 milliards d'euros TTC sans les coûts et charges annexes partagés du parc d'aérogénérateurs sur la base de 210 000 €/MW TTC.

Les sociétés de parc ont déposé en garantie 50 000 euros puis 65 000 euros (pour un coût effectif ttc de 420 000 euros) soit environ 12% ou 15 % de cette charge[11], ce qui signifie que 88% de la dépense des 3,36 milliards reviendra aux communes ou aux propriétaires des terrains et, disons-le, à l'État soit 3,4 milliards d'euros auxquels on ajoutera les coûts et charges annexes (frais divers, chemins d'accès, parkings et postes de raccordement) si le groupe financier auquel le parc appartient n'y subvient pas en l'absence de repowering.

9° Synthèse et Conclusions

Le démantèlement des aérogénérateurs constitue un nouveau défi lié à une structure de production industrielle bien particulière auquel nous ne sommes pas préparés et, qui au-delà des messages qui sont délivrés, présente de nombreuses difficultés avec une empreinte environnementale qui est loin d'être neutre. Il est urgent que les professionnels prennent à leur charge les recherches nécessaires au développement et à la maîtrise de cette filière industrielle, en se rapprochant si nécessaire de l'industrie aéronautique et nautique ainsi que du syndicat de la plasturgie pour ce qui concerne le traitement des pales.

Les exigences sociétales d'une part, l'accroissement de la pression réglementaire qui en est la conséquence d'autre part, conduiront à un accroissement des coûts déjà notoirement sous-estimés, et ce d'autant que des mesures de protection des travailleurs et de l'environnement pourraient apparaître au fil du temps et de l'expérience.

A défaut, un nouveau type de friche industrielle pourrait voir le jour, diffuse dans l'espace et destructrice de nos paysages. Un nouveau type de centre de stockage verra également le jour nécessairement eu égard aux évolutions environnementales. Ces nouveaux centres feront l'objet de nouvelles taxes au poids et au volume afin de favoriser les futures filières de recyclage « propre ».

Enfin, on peut considérer à ce jour les frais de démantèlement sous-estimés en raison des orientations légales que vont prendre la destruction des socles en béton ferrailé. Les nouveaux textes prônent son enlèvement total alors que jusqu'à présent on tolérait, en plaine, l'arasement du socle à la profondeur de 0,80 mètre.

Les chiffres adoptés dans notre exemple de la page 19 montrent que le coût de l'arasement à 0,80 mètre représente 40 % du prix de revient du démantèlement (122 500 € pour un total de 293 235 €). Avec la prise en compte d'un enlèvement total du socle, disons sur 5 mètres, on atteindrait un prix supplémentaire de 200 à 400 000 € HT selon les effets quantitatifs du volume de béton sur les coûts. On passerait alors de ces 40 % actuels à un pourcentage pouvant atteindre 65 %.

ANNEXE

LE DEMANTELEMENT EN ALLEMAGNE

source : <https://www.bild.de/regional/bremen/bremen-aktuell/rueckbau-in-der-nordsee-aelteste-windkraftanlagen-werden-abgebaut-70697528.bild.html>

Nos voisins allemands ayant, disons, une dizaine d'années d'avance en matière de démantèlement, nous avons tenté d'en savoir plus. Il ressort peu d'informations fiables et officielles sur l'existence de filières adaptées.

En Allemagne les coûts de démantèlement d'un aérogénérateur sont réputés représenter entre 2 et 10% des coûts d'investissement.

Pour 2 %, on détruit l'aérogénérateur à tour en béton et son socle à l'explosif. Les matériaux sont exportés vers des pays d'accueil improbables à condition d'être proche d'un port.

Les plus anciens aérogénérateurs de la mer du Nord sont démontés : De nouvelles opportunités d'affaires :



Brême / Hambourg - Il y a plus de 4500 aérogénérateurs en mer du Nord, et au cours de la transition énergétique, il y en a plus chaque année. Mais maintenant, les plus anciens aérogénérateurs y sont démantelés. La raison : ils ont atteint la fin de leur vie.

22 aérogénérateurs devront être retirés de la mer du Nord cette année 2020, comme annoncé par l'Institut de recherche économique de Hambourg HWWI. En 2023, il y aura 123 turbines et en 2030 plus de 1000 centrales d'aérogénérateurs auront atteint la fin de leur durée de vie. C'est le résultat d'études menées par le HWWI et d'autres institutions qui se sont réunies dans un projet international commun.

En raison des conditions météorologiques difficiles en mer et de l'entretien coûteux, la durabilité technique des aérogénérateurs offshore est estimée à seulement 20 à 25 ans, soit cinq à dix ans plus courte que sur terre. Après cela, les systèmes seront soit entièrement renouvelés et renforcés (repowering), soit complètement démantelés et éliminés. Les centrales d'aérogénérateurs offshore allemandes ne sont pas affectées dans un premier temps car les centrales les plus anciennes n'ont qu'une bonne dizaine d'années. Mais il existe des centrales d'aérogénérateurs plus anciennes en mer du Nord, par exemple en Scandinavie, aux Pays-Bas et en Grande-Bretagne.

L'industrie des aérogénérateurs connaît le même développement qu'avant la production de pétrole et de gaz, qui doit démanteler des centaines de plates-formes de production en mer du Nord après l'épuisement des champs. Il existe déjà de nombreuses entreprises hautement spécialisées pour cela ; c'est une opération d'environ un milliard de dollars. La même chose pourrait arriver dans l'industrie des aérogénérateurs. Au plus tard, lorsque le nombre de systèmes obsolètes augmentera, la démolition deviendra également une activité rentable pour les entreprises et les sites spécialisés. « *Nous avons besoin de bons concepts de démantèlement pour être économiquement et écologiquement efficaces et donc aussi travailler durablement* », a déclaré Silke Eckardt, professeur pour l'approvisionnement en énergie durable et l'efficacité des ressources à l'Université de Brême.

Les ports sont également porteurs de nouvelles opportunités. "L'Allemagne du Nord en particulier peut créer des points de contact importants pour les activités futures dans ce domaine avec ses ports maritimes", a déclaré Isabel Sünnner de HWWI.

En plus des goulots d'étranglement infrastructurels, il existe cependant un manque prévisible de personnel qualifié pour accompagner le processus de démantèlement. "Si, cependant, les ports et les industries en aval s'adaptent rapidement

aux défis à venir, un nouveau domaine d'activité apparaîtra pour les sites du nord de l'Allemagne."

[1] La garantie financière d'origine de 50 000 euros (par aérogénérateur) a été portée à 65 000 euros en 2018 puis redéfinie par l'arrêté du 22 juin 2020 qui en détermine les modalités de calcul dans son annexe II et qui doit être réactualisée tous les cinq ans.

[2] Le même arrêté du 22 juin 2020 en précise l'avenir, c'est à dire les conditions de conduite des opérations de démantèlement.

[3] Par exemple, une Gamesa G80 de 2 MW pèse 127 à 283 tonnes pour le mât, 108 tonnes pour le rotor et a nacelle et sans les pales. Source : <https://www.batiproduits.com/fiche/produits/eolienne-de-2-mw-a-pas-variable-p69095973.html>. Pour une Vestas V90, chaque pale de 45 mètres pèse 6,5 tonnes soit 20 tonnes supplémentaires au total par aérogénérateur.

[4] L'unité de mesure des coûts de transport des pondéreux est le km-tonne, les devis utilisant cette unité. Le montant de 50 km-tonne définit le transport soit d'une tonne de pondéreux sur 50 km, soit le transport de 50 tonnes sur 1 km. Cette unité concerne le transport uniquement et pas les opérations de chargement-déchargement qui peuvent, dans certains cas, s'avérer coûteuses.

[5] Ce chiffre diffère de celui fixé dans la PPE pour 2035.

[6] Dans sa présentation du 16 octobre 2017 Netwind reconnaît l'absence de structuration de ce marché de la démolition des aérogénérateurs et propose la mise en place d'un financement public pour la création d'une plateforme régionale, ignorant totalement les capacités de l'usine pilote de l'ENSG de Nancy (« Étude d'une filière D3 R – éoliennes terrestres » 16 10 2017, présentation de Netwind avec projet de création d'une plate forme de recyclage, recherche de financement et d'un opérateur en liaison avec le centre de recherche GRESPI - Groupe de Recherche En Sciences Pour l'Ingénieur de l'université de Reims fédérant des recherches dans les domaines de la mécanique, de la thermique, de la biomécanique et de l'ingénierie santé, du génie des matériaux et du génie des procédés- Projet D3R de la DREAL région Grand Est, http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/6_filiere_d3r.pdf).

[7] Les lanthanides: un recyclage polluant et peu rentable
<https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2019/06/04/recyclage-des-terres-rares-au-japon-le-potentiel-des-mines-urbaines> : Solvay a renoncé au recyclage des terres rares en 2011
(<https://www.usinenouvelle.com/article/solvay-renonce-au-recyclage-des-terres-rares.N375935>).

[8] Repowering : voir l'article du blog du collectif Énergie et Vérité: <https://www.energieverite.com/post/le-repowering-c-est-bien-plus-qu-un-changement-de-moteur-des-%C3%A9oliennes>

[9] Nous avons pris ce pourcentage reconnu de 10 % pour représenter les frais généraux, c'est à dire commerciaux, management et financiers.

[10] Le bénéfice du prestataire a été fixé arbitrairement au minimum de 20 %. On comprend que les aléas de ce type de chantier et la nature des pratiques commerciales du métier de récupérateur-démolisseur ne peuvent que faire grimper les prix de vente effectifs sur la base de pourcentages plus élevés.

[11] Pour une garantie de 50 000 € par aérogénérateur pour un coût de démantèlement de 420 000 € TTC on

obtient 11,8 % arrondi à 12 %, pour une garantie de 65 000 € par aérogénérateur on obtient 15,5 % arrondi à 15 %.