

## Le recyclage fait tourner le vent des pales

C'est l'un des derniers écueils auquel est confronté le secteur pour assurer vertueusement le démantèlement de ses parcs. Mais des solutions émergent, tant pour recycler les pales déjà produites que pour faciliter le recyclage des futurs modèles mis sur le marché.



La France compte quelque 8 000 éoliennes implantées sur son sol depuis les années 90.



Reciclaia a mis au point Constrictor, un dispositif mobile de compression des pales. Photo : © Constrictor

Elles représentent une part infime de la masse d'une éolienne<sup>1</sup>. Les pales constituent pourtant aussi une véritable pierre d'achoppement. Ces éléments de quelques dizaines de mètres de longueur, formant avec le moyeu le rotor de l'éolienne, se heurtent en effet à un défi : celui du recyclage. En cause, les matériaux composites qui les constituent, mêlant résines et fibres de verre ou de carbone ; des éléments si intimement intriqués que leur séparation ne peut se faire qu'aux prix d'efforts techniques difficiles à mettre en œuvre sans compromettre le bilan écologique de l'opération ou sa viabilité économique. Du moins pour l'instant. « Aujourd'hui, des techniques, il y en a ! Des techniques vertueuses, un peu moins... Mais surtout, ce qui manque, c'est le modèle économique.

On est face à un vrai problème : produire de la fibre de verre coûte moins cher que recycler », assure en effet Benoît Comfaits, président de l'AD3R<sup>2</sup>, consortium d'entreprises né en 2016 en Champagne-Ardenne dans le but de créer la première filière industrielle de démantèlement d'éoliennes.

**Résultat, alors que le mât**, la nacelle ou encore la fondation en béton des éoliennes issues des premiers parcs démantelés en France sont en grande partie réutilisés ou recyclés, les pales, elles, finissent en général incinérées en cimenteries. Une approche loin d'avoir toutes les vertus du recyclage, mais qui discrédite en tout cas l'image d'Épinal de pales en fin de vie s'entassant par centaines dans de vastes « cimetières »... « Les images que l'on voit circuler proviennent de l'étranger. Nous n'avons, à notre connaissance, pas de sites d'enfouissement de ce type dans notre pays. D'un point de vue écologique, mais aussi économique et pour une question d'image, les acteurs de l'éolien n'ont pas d'intérêt à enfouir les pales », assure la responsable de la filière éolien terrestre au Syndicat des énergies renouvelables (SER), Camille Charpiat.

L'association européenne de l'énergie éolienne WindEurope a toutefois lancé en juin dernier un appel aux dirigeants des pays de l'Union européenne visant à interdire purement et simplement, d'ici à 2025, l'enfouissement des pales. Une interdiction déjà en place en Autriche, Finlande,

Allemagne ainsi qu'aux Pays-Bas, mais que les responsables de WindEurope voudraient voir harmonisée à l'échelle européenne.



Avec la technologie CRS, Reciclaia a mis au point un procédé thermique pour séparer les résines des fibres. Photo : © Constrictor

**En France, si l'interdiction d'enfouissement** n'est pas, en tant que telle, inscrite dans la loi, elle découle en revanche des objectifs de recyclage fixés dans la réglementation. « Les éoliennes sont soumises à la réglementation ICPE, définie par l'arrêté du 26 août 2011, modifié en 2020. Cet arrêté comporte des obligations, notamment en matière de recyclage et de réutilisation », explique Camille Charpiat. Dès juillet prochain, les exploitants seront ainsi soumis à une obligation de recyclage ou de réutilisation de 90 % de la masse totale de l'éolienne, dont 35 % du rotor. Une part qui passera à 45 % en 2023, puis à 55 % en 2025. « À partir du moment où l'on doit en recycler au moins une partie, il est de toute façon difficile d'imaginer ne pas le faire pour le reste », souligne Camille Charpiat.

En outre, la loi Agec prévoit une interdiction, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2022, de l'enfouissement des déchets valorisables. « Ainsi, les pales d'éo-

liennes ne seront plus enfouissables légalement en France, sauf à ce que la preuve soit apportée qu'aucune autre solution n'est envisageable. La valorisation en combustibles solides de récupération (CSR) étant possible, cela interdit de facto l'enfouissement », analyse le président de l'AD3R, Benoît Comfaits, qui juge positive la mise en place de cet agenda : « Elle va forcer la filière à développer des réponses ; et donc favoriser le modèle économique [du recyclage]. » Des solutions opérationnelles, mais aussi écologiquement et économiquement viables commencent ainsi à faire leur apparition. C'est le cas notamment des technologies de recyclage développées depuis 2011 et mises sur le marché à partir de 2017 par la start-up espagnole Reciclalia. Constricto, la première des technologies développées par Reciclalia, porte bien son nom. Il s'agit en effet d'un dispositif mobile et entièrement automatisé permettant de comprimer et de broyer in situ les pales d'éoliennes. Une fois produit, le broyat de composite est alors acheminé jusqu'à l'usine de traitement de la start-up, située près de Tolède.

**Prévue pour traiter 300 pales par an**, l'installation met en œuvre la seconde technologie développée par Reciclalia : CRS, pour *Composite Recycling System*. Un procédé thermique particulièrement vertueux, basé sur la séparation par craquage thermique des résines emprisonnant les fibres. « Le réacteur intègre un système de cogénération qui permet de réduire la consommation d'énergie du procédé. [...] Là où la production d'une tonne de fibres de verre vierges entraîne l'émission de trois tonnes  $\text{eqCO}_2$ , ou de treize  $\text{teqCO}_2$  pour les fibres de carbone, notre procédé n'en émettrait que 500 kg environ, quelle que soit la fibre, selon nos premières estimations », fait valoir le directeur des opérations de l'entreprise David Romero Vindel. Il souligne également un autre intérêt

du procédé : il n'altère quasiment pas les propriétés des fibres, qui peuvent ainsi être réutilisées dans de multiples applications. Lauréate, entre autres distinctions, du prix start-up EDF Pulse 2020, Reciclalia ambitionne désormais de poursuivre sa croissance en ouvrant deux usines supplémentaires en Espagne, mais également une en France et une autre en Allemagne ou aux Pays-Bas. « Notre objectif est d'avoir, d'ici à 2025, une capacité de recyclage cumulée d'environ 40 000 tonnes par an, en incluant les déchets d'autres secteurs que l'éolien [comme l'aéronautique] », prévoit David Romero Vindel. Une montée en puissance qui devrait ainsi contribuer à rendre compétitif le recyclage des pales d'éoliennes. Des pales qui pourraient, en outre, devenir facilement recyclables grâce aux efforts de conception désormais consentis par certains fabricants.



Siemens Gamesa produisant des pales d'éoliennes conçues pour être facilement recyclables. Photo : © Siemens

**L'annonce date de septembre dernier** : la production par le fabricant Siemens Gamesa dans son usine danoise d'Aalborg des pales pensées pour être facilement recyclables. « La seule chose qui change, c'est la résine, et rien que la résine. Les fibres restent les mêmes, tout comme le procédé de fabrication. Cela nous permet d'offrir les mêmes garanties de durabilité », assure Frédéric Petit, directeur Business Development chez Siemens Gamesa. En fin d'exploitation, un simple bain légèrement acide, chauffé à moins de 100 °C, devrait suffire à dissoudre la résine de la pale, assure l'industriel. Trois clients, parmi lesquels EDF Renouvelables, ont ainsi d'ores et déjà

conclu un accord avec Siemens Gamesa pour déployer ces pales sur certains de leurs projets. Destinées, pour l'heure, uniquement au marché de l'éolien en mer, elles devraient à l'avenir être disponibles également pour les projets terrestres. « Outre notre usine d'Aalborg, tous nos sites devraient être en capacité de produire ces pales d'ici à 2024. C'est une option que nous proposons à nos clients, et nous espérons qu'ils la sélectionneront de plus en plus. Nous serons prêts, en tout cas, à répondre à la demande », conclut Frédéric Petit.

**En France, un vaste projet** visant le développement d'une pale d'éolienne 100 % recyclable a également vu le jour en septembre 2020. Baptisée Zebra (*Zero waste Blade ReseArch* – Recherche sur les pales zéro déchet), la démarche est pilotée par l'Institut de recherche technologique Jules-Verne, situé près de Nantes, et réunit un consortium d'acteurs du monde de la recherche et de l'industrie. « Cet enjeu du recyclage des pales d'éoliennes est à la fois mineur par rapport à la masse de l'éolienne, mais aussi important pour la bonne appropriation de la filière. Nous avons donc cherché à apporter une solution industrielle en nous unissant au sein d'un consortium rassemblant l'ensemble de la chaîne de valeur », retrace Vianney de Lavernée, responsable stratégie, RSE et innovation pour Engie France Renouvelables, l'un des principaux acteurs du projet Zebra, lancé en septembre 2020 pour 42 mois. Le cœur de la solution sur laquelle planche le consortium repose sur une résine malléable à faible température développée par Arkema, également membre du projet. Une nouvelle résine qui pourra donc être facilement séparée des fibres qu'elle emprisonne, mais dont l'intérêt ne s'arrête pas là, comme le souligne Vianney de Lavernée : « Grâce à cette résine, les pales seront certes recyclables, mais surtout entièrement éco-conçues :

*100 % zéro déchet dès la phase de fabrication, et économes en énergie. »*



Engie France Renouvelable est l'un des principaux acteurs du projet Zebra. Les recherches portent sur une résine malléable, développée par Arkema. Photo : © Engie

**Après une phase de prototypage,** le consortium s'attelle désormais à fabriquer les premières pales grandeur nature, dont la production est prévue pour janvier 2022. *« Nous allons pouvoir les tester et réaliser des analyses de cycle de vie robustes. Ce se-*

*ra le rôle d'Engie dans cette phase du projet : analyser les flux de matière, d'énergie, le comportement de la pale et sa durabilité ; mais également les coûts, qui, même s'ils ne sont pas répartis de la même manière qu'une pale classique, devront rester compétitifs »,* décrit Vianney de Lavernée.

Une fois le projet abouti, c'est l'un des membres du consortium, LM Wind Power, qui assurera la production de ces pales, pensées dès leur conception pour ne plus être une pierre d'achoppement en matière de recyclage. ■

*par Benoît Crépin*

---

1. Entre 2 % et environ 8 % en fonction des modèles, 6 % selon l'Agence de la transition écologique (Ademe). 2. Association pour le développement de la filière démantèlement, recyclage, reconditionnement, revente en région Grand Est. 3. *Repowering* : démantèlement des machines et remplacement par des éoliennes plus puissantes. 4. *« Powered purchase agreement »* : Contrats de gré à gré autorisant la vente d'électricité en direct à un client.

« À partir de juillet 2022, 90 % de la masse totale de l'éolienne devra être recyclée ou réutilisée

## La piste de l'hydrogène a le vent en poupe pour l'éolien



Outre le démantèlement, une autre perspective s'ouvre pour certains parcs éoliens en fin d'exploitation : celle de la production d'hydrogène. « *L'hydrogène permettrait de donner une nouvelle vie, un nouveau modèle économique aux quelque 40 % de machines non repowerables*<sup>3</sup>. La production d'hydrogène renouvelable permettrait de rendre un service local et d'aller vers un circuit court de l'énergie ; chose très demandée par la population », plaide en effet Benoît Comfaits (*photo*), président de l'AD3R et fondateur de la société de conseil en stratégie industrielle BCO Conseil. Une voie déjà explorée dans l'Aisne, à Tupigny, où une station de production d'hydrogène alimentée par des éoliennes devrait bientôt voir le jour. De quoi ravitailler, notamment, deux véhicules roulant à l'hydrogène, dont la mise à disposition pour les habitants devrait avoir lieu en 2022. Le président de l'AD3R en est ainsi convaincu : « *On a tout intérêt, aussi bien économiquement que socialement ou encore pour des raisons d'acceptabilité, à développer l'hydrogène avec les*

*parcs éoliens. C'est un vrai levier de pérennisation des parcs non éligibles au repowering.* »

## Démantèlement des parcs éoliens : quels sont les perspectives en France ?

Le leader du marché, Engie France Renouvelables (15 % des parts de marché) a commencé le démantèlement de deux de ses parcs. « *Une chose est sûre : on aura des volumes beaucoup plus importants dans les prochaines années* », prévoit toutefois le responsable stratégie, RSE et innovation de l'entreprise, Vianney de Lavernée. Une perspective que confirme Benoît Comfaits, président de l'AD3R : « *L'essor des corporate PPA<sup>4</sup> a donné naissance à un nouveau modèle économique, qui va au-delà du contrat d'achat. Les producteurs peuvent en effet exploiter leurs machines sept ans de plus. Toutes nos prévisions ont donc été décalées. On mise désormais sur une émergence du marché du démantèlement aux alentours de 2023/2025.* »

Le Syndicat des énergies renouvelables (SER) estime ainsi qu'en 2025, 400 à 600 éoliennes seront démantelées chaque année, contre une centaine actuellement. « *En 2030, le marché devrait tourner à plein régime* », anticipe finalement le président de l'AD3R. Une échéance qui laisse en tout cas un peu de temps au secteur pour fourbir ses armes en matière de recyclage.

