



## Appel à projet n° 2-13 / 2022

Date limite d'envoi des réponses : **vendredi 3 juin 2022**

### Recyclage et valorisation des composants d'éoliennes

#### Etat de l'art technico-économique et perspectives

##### Contexte

En France, la production électrique d'origine éolienne atteignait 34.1 TWh en 2019, portant le taux de couverture par l'énergie éolienne de la consommation moyenne d'électricité à 6.3%. Le parc raccordé comprenait à fin 2019 environ 8000 éoliennes.

La durée de vie moyenne d'une éolienne est comprise entre 20 et 30 ans. Aujourd'hui, plus de 20 ans après leur mise en service, les premières installations sont démantelées pour être le plus souvent remplacées par des éoliennes plus puissantes. De plus, actuellement d'anciens parcs éoliens sont démontés avant d'atteindre leur fin de vie. En effet, la technologie dans ce domaine ayant fortement évoluée, le remplacement d'anciens équipements par des éoliennes plus performantes, s'avère rentable.

Il existe un marché de l'occasion pour les anciennes éoliennes. Elles prennent donc parfois le chemin de pays voisins pour y poursuivre une seconde vie. Mais, le plus souvent elles sont mises au rebut. En France, on estime à près de 1 500 le nombre d'éoliennes à démonter dans les cinq ans à venir. La puissance installée en France est actuellement de 18,8 GW. La nouvelle programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2024 - 2028) prévoit d'atteindre pour l'éolien terrestre 34 GW en 2028 et pour l'offshore 6 GW en 2028 (MTES, 2020). On estime que les flux à recycler passeront de 19 000 tonnes en 2020 à 220 000 tonnes en 2025, pour atteindre 939 000 tonnes en 2030 (*Observ'ER 2018, journal de l'éolien n°29*).

La PPE comporte une clause qui spécifie que le recyclage des principaux composants des éoliennes sera rendu obligatoire d'ici 2023. Cette perspective est à l'origine de la création d'une filière française pour le démantèlement des éoliennes en fin de vie, structurée autour de l'AD3R (*Association pour la Déconstruction des parcs éoliens, le Reconditionnement des gros composants, le Recyclage des pales et la Revente des métaux, des matériaux recyclés et des composants*). Le Ministère de la transition écologique a publié en mai 2019, un rapport portant sur les conditions d'émergence en France d'une économie circulaire dans la filière éolienne. Les articles R 553-1 à 8 du Code de l'Environnement, prévoient que la mise en service des installations éoliennes terrestres est subordonnée à la constitution de garanties financières destinées à couvrir les opérations de démantèlement en fin de vie, l'évacuation des déchets et de remise en état du site. A cet effet, les promoteurs doivent, au moment de la construction d'un parc, provisionner un montant par éolienne

pour son futur démantèlement. Un arrêté ministériel impose l'enlèvement des câbles électriques enterrés, l'excavation des fondations sur une profondeur minimale d'un mètre (dans le cas de terrains agricoles) et leur remplacement par des terres dont les caractéristiques sont comparables au sol en place. Les aires de grutage et les chemins d'accès doivent aussi être déconstruits.

Après démontage, les composants d'une éolienne peuvent être recyclés. Par exemple, une éolienne de 2 MWe représente 840 tonnes de béton, 300 tonnes d'acier et 25 tonnes de composites. Cependant, quelques dizaines seulement d'éoliennes ont été démantelées en France depuis l'installation du premier parc en 1996.

A partir du 1<sup>er</sup> juillet 2022, au moins 90 % du poids des éoliennes démantelées devra être réutilisé ou recyclé, dont au moins 35 % pour la partie la plus complexe à recycler, à savoir les rotors, c'est-à-dire la partie au-dessus du mât constituée de la nacelle et des pales. Ces exigences devraient progressivement devenir plus sévères.

Les parties métalliques comme le mât et le moyeu constituent plus de 90 % du poids des aérogénérateurs et se recyclent dans les filières existantes. La valeur marchande de ces ferrailles assure souvent la rentabilité d'une opération de démontage d'une éolienne. Le béton armé des fondations peut aussi être valorisé : trié, concassé et déferraillé, il est réutilisé sous la forme de granulats dans le secteur du BTP.

Les pales pèsent 8 % du poids total d'une éolienne. En fin de vie, la question de leur recyclage est un problème délicat. Elles sont en effet constituées de matériaux composites (mélange de résines thermodurcissables, époxy ou de polyesters et de fibre de verre/carbone) difficiles à recycler.

En France d'ici 2025, l'ADEME s'attend à un volume de démantèlement de 1 GW par an (plus de 10 GW en Europe). Cela représentera environ 15 000 tonnes de matériaux composites à traiter (*Journal de l'éolien n°29*).

Une première difficulté réside dans l'encombrement de ces pales en fin de vie, dont la longueur peut varier actuellement entre 20 et 50 mètres, pour une masse allant de 5 à 20 tonnes. En quarante ans, le diamètre des rotors est passé de 17 à 160 mètres avec des perspectives à 250 mètres pour l'offshore. Leur transport en une pièce vers les usines de recyclage serait une opération coûteuse voire impossible. C'est la raison qui a incité certains à mettre au point des dispositifs qui permettent de les découper en morceaux, directement sur place, rendant leur transport plus aisé.

A ce jour, au niveau mondial, dans la majorité des cas, les morceaux de pales sont actuellement enfouis en centre de stockage.

Ces morceaux peuvent aussi être broyés et valorisés comme combustibles (CSR) dans les cimenteries, en remplacement des combustibles fossiles traditionnellement utilisés ; les cendres produites après combustion des CSR entrant directement comme matière première dans la fabrication du ciment. Cette valorisation évite donc la production de déchets. Toutefois, les capacités assimilables par cette filière sont sans doute limitées.

Une autre possibilité consiste à utiliser le broyat de pales pour fabriquer de nouveaux matériaux composites. C'est notamment la solution mise au point par l'Université de Washington (USA), en collaboration avec General Electrics (GE) et Global Fiberglass Solutions Inc. (GFSI) de Seattle. Le produit baptisé *Ecopolycrete* obtenu à partir du broyat des pales serait aussi résistant que les composites à base de bois. De très nombreux usages peuvent être envisagés comme des dalles de

sol, des glissières de sécurité le long des axes routiers, des plaques d'égout, etc. En moins d'un an, GFSI a recyclé 564 pales selon cette technique.

L'une des innovations des éoliennes qui pourrait justifier d'aller vers de l'*upcycling* (retour à une matière équivalente) est la part grandissante de **fibre de carbone** dans les pales. Coûteuse, les fibres de carbone sont pourtant de plus en plus utilisées (prix de la fibre de verre : 3 € HT/kg - prix de la fibre de carbone : 15 à 20 € HT/kg). De 58 000 tonnes en 2015, la demande mondiale en fibre de carbone est passée à 78 500 tonnes en 2018 et devrait atteindre les 120 500 tonnes en 2022, selon un rapport sur le marché mondial des composites réalisé par AVK, la fédération allemande des plastiques renforcés. L'éolien représenterait l'un des principaux marchés pour le recyclage des fibres de carbone. Notons qu'un des principaux intérêts d'utiliser des fibres de carbone recyclées est, en dehors de son coût, la réduction de l'impact environnemental du recyclé sur les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à celui lié à l'élaboration de fibres vierges. En effet, selon l'ADEME, la quantité de CO<sub>2</sub> émise par la production d'une tonne de fibre de carbone vierge est voisine de 40 t.

La R&D est maintenant très active sur ces sujets de la fin de vie des éléments éoliens. Une des technologies envisagées pour le recyclage des composites à fibres de carbone est la solvololyse, éventuellement en conditions supercritiques, permettant par dissolution du composite, la séparation des fibres de la résine. Des développements sont également en cours concernant l'utilisation de la pyrolyse (450-800°C, atmosphère réductrice) permettant la séparation fibre/résine. La société espagnole Reciclalia Composite a développé un système de recyclage par pyrolyse ainsi qu'un système de broyage sur site pour faciliter le transport des pales d'éoliennes.

Par ailleurs, la société Vestas Wind Systems A/S (Danemark) développe actuellement un procédé permettant la dégradation puis le recyclage chimique des matrices époxy sous forme de résine « vierge » (projet CETEC, *Économie circulaire pour les composites époxy thermodurcissables*).

La société Siemens Gamesa développe également une nouvelle résine pour l'élaboration des pales d'éoliennes, celle-ci permettant leur recyclage par trempage des pales dans un bain d'acide chauffé pour séparer les deux composants (résine et fibres carbone). Les composants ainsi récupérés seraient ensuite réutilisables pour fabriquer de nouveaux produits comme des coques de bateaux.

La start-up XCrusher développe un procédé de broyage/séparation électromécanique. Les différents éléments comme la résine et la fibre sont alors séparés selon leur conductivité électrique.

Le projet ZEBRA lancé en 2020 rassemble acteurs industriels et centres de recherche et vise à démontrer la faisabilité technico-économique et environnementale de pales d'éoliennes en thermoplastique, dans une approche d'éco-conception.

La plate-forme Canoe travaille depuis 2015 sur l'écoconception des pales. Canoe participe au projet Effiwind. Ce projet vise à remplacer la résine thermodurcissable utilisée pour l'élaboration des pales par une résine thermoplastique, rendant plus facile non seulement la fabrication des pales (polymérisation à froid) mais aussi sa dépolymérisation en fin de vie par pyrolyse rapide (recyclage chimique), et permettant la récupération des fibres de carbone.

L'usine LM Wind Power à Ponferrada en Espagne vient de sortir le prototype de la plus grande pale d'éolienne au monde, annoncé comme 100 % recyclable, en composite thermoplastique qui fait appel à la résine Elium® d'Arkema et à de nouveaux matériaux en fibre de verre haute performance d'Owens Corning.

Parmi les autres composants recyclables mentionnés également les aimants permanents. Ils représentent de l'ordre de 600 kg/MWe installé selon le BRGM. Ces aimants permanents, de type néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B), contiennent environ 30% de terres rares. La production de tels aimants se concentre au Japon et en Chine ; cette dernière fournissant par ailleurs l'essentiel des terres rares et contrôlant ainsi le marché. En France, seuls 3% du parc éolien terrestre installé comportent des aimants permanents. Par contre, les futures éoliennes en mer en seront largement équipées, même si leur démantèlement n'interviendra qu'à partir des années 2040.

Les fabricants d'éoliennes cherchent à s'affranchir de cette éventuelle dépendance en développant des génératrices synchrones sans aimants à terres rares. A terme, la réutilisation directe, après reconfiguration et régénération de l'alliage, semble la voie de recyclage la plus pertinente économiquement, à condition d'envisager les volumes collectés à échelle européenne.

Concernant le marché en volume du démantèlement/recyclage, il pourrait représenter un montant cumulé variant selon les estimations entre 210 et 440 M€ d'ici 2030 (ADEME, 2019).

## **Objectifs**

Réaliser un état des lieux du développement dans le monde des technologies de recyclage et valorisation des différents composants d'éoliennes et leurs impacts sur l'environnement. Notons notamment :

- **Le potentiel de développement des filières de démantèlement/recyclage/valorisation** des éoliennes en fin de vie, à court et moyen termes (France, Allemagne et Europe) ;
- **Le cadre réglementaire** associé (France et Union Européenne) ;
- Les développements en cours (monde), concernant les **technologies de démantèlement/recyclage** et l'**éco-conception** des différents composants des éoliennes et leurs impacts environnementaux et sanitaires (santé des travailleurs);
- **Les coûts d'équipement et de fonctionnement** prévisibles des opérations et technologies de démantèlement/transport/recyclage des différents composants des éoliennes en fin de vie, ainsi que la viabilité technico-économique des procédés associés.

## **Contenu de l'étude - Programme de travail**

*Les proposant feront preuve d'initiative quant à la structuration du projet et présenteront dans leur réponse une organisation appropriée de la mission ; organisation qui devra permettre de répondre au mieux aux objectifs énoncés, notamment via la réalisation des éléments demandés ci-dessous.*

Le proposant détaillera les différents composants constructifs d'une éolienne (fondations, massif, mat, turbine, pales, etc.).

Il fournira les données disponibles, concernant la programmation en France du démantèlement du parc des éoliennes en fin de vie ou en *repowering*, en précisant les flux associés (t/an) et leurs évolutions à terme, déterminant le devenir et la rentabilité potentielle des filières de recyclage.

Il réalisera un état des lieux concernant **la réglementation et les soutiens en vigueur**, en France et en Europe, concernant le *repowering*, le démantèlement, le stockage, le transport et le recyclage des composants issus des installations éoliennes.

Il précisera les principaux acteurs concernés en France ainsi qu'en Europe et ce, particulièrement au Danemark et en Allemagne.

**Il établira l'état des lieux de la fin de vie de chacun des constituants.** Pour cela,

- Il précisera les chiffres de répartition massique entre réemploi, recyclage et élimination (France, Allemagne<sup>1</sup>, Europe, Monde).
- Il abordera les questions du démantèlement de chacun de ces constituants :
  - Déferrailage des massifs, broyage des bétons et élaboration de granulats,
  - Découpe des mâts et recyclage des métaux,
  - Démantèlement de la nacelle, avec récupération des métaux et démontage des aérogénératrices avec récupération des aimants permanents,
  - Démantèlement des pales, découpage (avec prise en compte des problèmes **d'émissions de poussières**), puis stockage des matériaux composites résines/époxy.
- Il listera les éléments nécessaires et les coûts associés, en termes de démontage avant recyclage/valorisation (moyens techniques et humains nécessaires sur site, infrastructures à bâtir, plateformes, grues, etc.).
- Il précisera les techniques de tri, de transport des différents composants, une fois démantelés.
- Il décrira ensuite les différents procédés et technologies utilisés actuellement dans le monde en recyclage / valorisation des différents composants d'éoliennes en fin de vie. Une attention particulière sera apportée :
  - au recyclage mécanique voire chimique par broyage puis traitement des pales en polymère thermodurcissable, à la qualité et au devenir du recyclat obtenu,
  - à la valorisation énergétique en tant que CSR,
  - aux retours d'expériences (échelles pilote et industrielle).

Il indiquera, dans chacun des cas, le niveau de développement, les unités déployées et retours d'expériences disponibles, les coûts d'équipement et de fonctionnement associés, ainsi que les **impacts environnementaux et sanitaires** des technologies utilisées.

De même, il estimera les volumétries des marchés de revente et les prix de reprise des matériaux ainsi recyclés (granulats béton, ferreux et non-ferreux type cuivre, fibres verre et carbone, terres rares, CSR, etc.).

Le proposant, sur la base de REX d'opérations de démantèlement/recyclage d'éoliennes en fin de vie cherchera à établir la rentabilité opérationnelle que peut générer cette activité. Cette rentabilité dépend du différentiel entre le coût des opérations de démantèlement-recyclage (coûts chantier, coûts de transport, coûts des équipements de recyclage, coûts de mise en décharge, etc.) et le produit financier que peut en retirer le recycleur.

---

<sup>1</sup> Tout au long de l'étude, le cas de l'Allemagne sera à considérer avec attention ; ayant d'ores et déjà une filière de gestion de fin de vie opérationnelle.

Afin de se projeter dans ce que sera la filière de fin de vie des éoliennes et ou doivent porter les efforts dès maintenant, **le proposant réalisera également un état de l'art concernant les recherches et développements** en cours à la fois concernant les procédés de recyclage mais également l'évolution des matériaux utilisés qui permettront d'améliorer la circularité de cette filière.

Ainsi, il détaillera les développements récents concernant les procédés de séparation-recyclage des pales d'éoliennes (pyrolyse rapide, vapo-pyrolyse, solvolyse et vapo-solvolyse, usage des micro-ondes, des courants électriques pulsés, etc.) ainsi que la séparation/recyclage des terres rares contenues dans les aimants permanents des aérogénératrices.

Concernant les aimants permanents, trois voies sont envisagées : la réutilisation directe, la régénération de l'alliage et la séparation métallique (pyrométallurgie) et la séparation des terres rares par voie chimique (hydrométallurgie). Ainsi, le proposant détaillera les développements en cours concernant le recyclage des aimants permanents.

Pour les technologies identifiées, toutes informations précisant le rendement et concernant les pales, la qualité des fibres récupérées (pureté, longueur de fibres et les éventuelles pertes de propriétés mécaniques des fibres), les coûts d'équipements et de fonctionnement associés, les impacts environnementaux des procédés seront à rechercher.

Le proposant passera également en revue les différents travaux en cours concernant les possibilités de substitution des résines thermodurcissables, classiquement utilisées dans l'élaboration des pales, par des polymères thermofusibles.

Le proposant étudiera également les développements récents d'un nouveau concept de composites auto-renforcés à matrice thermoplastique (SRP, *self-reinforced polymer*).

Par ailleurs, concernant les aimants, des travaux importants sont menés pour remplacer les terres rares dans les aimants permanents ou en réduire la teneur. Ce sera une ouverture intéressante à présenter.

En fin d'étude, il listera les principaux freins et verrous à lever, et ce, aussi bien au plan technique, économique, environnemental et réglementaire, concernant le développement, à court et moyen termes, du recyclage / valorisation des composants d'éoliennes.

Le proposant pourra éventuellement proposer **des idées de travaux complémentaires**<sup>1</sup> permettant de traiter des points les plus prometteurs identifiés dans la présente étude.

***Le proposant aura l'opportunité de s'appuyer sur une bibliographie internationale récente, nombreuse et de qualité. Il pourra ainsi avancer rapidement sur les points les mieux documentés pour se focaliser sur des aspects plus spécifiques et moins bien couverts par les études existantes. Une liste provisoire de certains de ces aspects pourrait être présentée dans la réponse.***

---

<sup>1</sup> Points qui pourraient être proposés à RECORD pour des approfondissements lors de projets à venir.

### **Durée de l'étude**

12 à 18 mois

### **Cadre budgétaire**

40 000 euros hors taxes

### **Déroulement de l'étude et livrables exigés**

- **Déroulement d'une étude et procédures à suivre :**

<https://www.record-net.org/deroulement-etude/>

- Il est à noter qu'en fin de projet, à l'issue des réunions de travail telles que décrites dans la page ci-dessus, l'équipe organisera une réunion de restitution d'une heure environ par web conférence (système supporté par RECORD). Ce webinar aura pour but de présenter de manière didactique, les résultats détaillés de l'étude à l'ensemble des membres de RECORD et à toute personne que RECORD souhaitera convier.

- **Livrables**

Au minimum :

- 2 rapports intermédiaires en français (rapports « rédigés », pas de rendu sous forme de Powerpoint),
- 1 rapport final en français (rapport « rédigé », pas de rendu sous forme de Powerpoint),
- 1 diaporama en français présentant de manière synthétique les principaux enseignements de l'étude (powerpoint d'une vingtaine de slides),
- 1 diaporama en anglais présentant de manière synthétique les principaux enseignements de l'étude (powerpoint d'une vingtaine de slides),
- 1 synthèse détaillée des travaux en français et en anglais (environ 3000 mots par langue),
- Animation d'un webinar (comme explicité ci-dessus).

*Des compléments d'information concernant ces livrables (modèles à suivre, diffusion, etc.) sont disponibles via le lien mentionné ci-dessus.*

### **Valorisation**

Si le contenu du travail réalisé le permet, l'équipe retenue sera tenue de participer, à la demande de RECORD, à des actions de valorisation des résultats acquis au terme de ce projet (publication, séminaire). La réponse à cet appel pourra intégrer un développement sur ce point (valorisation envisagée : oui / non, moyens de valorisation adaptés au sujet, etc.).

### **Dépôt des projets**

Les projets devront impérativement être présentés en utilisant le **formulaire** disponible sur le site de RECORD, à la page de parution des appels d'offre.

Les réponses sont à retourner pour le **vendredi 3 juin 2022** dernier délai (date d'envoi du courriel et du dépôt sur le site).

Chaque dossier doit impérativement être fourni à la fois :

**1/** Par dépôt à l'adresse suivante :

<https://record-net.org/appels-d-offres>

**2/** Par courriel à l'adresse :

[contact@record-net.org](mailto:contact@record-net.org)

### **Evaluation des réponses**

Au-delà de la conformité des réponses aux consignes mentionnées ci-dessus et au modèle de réponse demandé par RECORD, les principaux critères d'évaluation seront la qualité et l'argumentation de la réponse, les compétences de l'équipe candidate (expériences, publications, etc.), la qualité et la disponibilité du personnel mis à disposition pour la réalisation du projet.