



Recyclage et valorisation des composants d'éoliennes

Présentation de l'étude RECORD
Pierre LEROY, ADIT

Journée de restitution
| 23 novembre 2023 | Saint Denis



Recyclage et valorisation des composants
d'éoliennes en fin de vie — Projet n° 2-13/2022
État de l'art technico-économique et perspectives

Séminaire de restitution
Paris, le 23 novembre 2023

Comité de pilotage et de suivi de l'étude

Liste des membres

- ❖ Fabrice Abraham – Renault
- ❖ Gérard Antonini – ReCoRD
- ❖ Tatiana Bratec – Engie
- ❖ Raphaël Breton-Godo - Total Energies
- ❖ Coryse Coudray – EDF
- ❖ Bénédicte Couffignal – ReCoRD
- ❖ Bruno Daille-Lefèvre – INRS
- ❖ Stéphane Dercourt - Séché Environnement
- ❖ Frank Despinois - Total Energies
- ❖ Adeline Élisabeth-Mesnager - Suez Recyclage et Valorisation France
- ❖ Paul Franc - Ademe

Liste des membres (suite et fin)

- ❖ Tiphany Genin - ministère de la Transition écologique
- ❖ Anne Grau – EDF
- ❖ Ronan Guermeur – Suez
- ❖ Mary Hanhoun – Engie
- ❖ Marie Keller - Veolia North America
- ❖ Ronan Levilly – INRS
- ❖ Doris Nicklaus - ministère de la Transition écologique
- ❖ Sven Saura – Veolia
- ❖ Pierre Stephan – EDF
- ❖ Violaine Tarizzo - ministère de la Transition écologique
- ❖ Ghislain van den Broek d'Obrenan – Paprec
- ❖ Marie Wouts - Engie

Contexte et enjeux

Contexte

- ❖ Les premiers parcs éoliens installés en France et Europe arrivant en fin de vie, se pose alors la question de la gestion et du devenir des éoliennes démantelées : réemploi ? marché de seconde main ? réutilisation ? recyclage ?
- ❖ Plusieurs obstacles restent à surmonter pour la filière de fin de vie des éoliennes, en particulier :
 - Recyclage des pales, à base de matériaux composites
 - Problème : difficulté de séparer la matrice organique et les renforts à base de fibres de verre ou de carbone
 - Recyclage des aimants permanents, à bases de terres rares
 - Problème : matériaux critiques/ stratégiques
- ❖ De nombreux développements sont en cours concernant le démantèlement, le recyclage et l'écoconception des différents composants des éoliennes — en particulier les pales et les aimants (Horizon 2020, Horizon Europe, etc.)

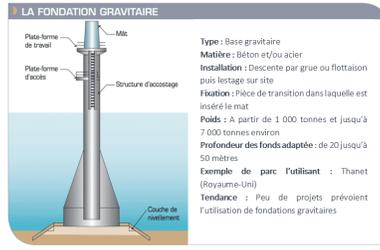
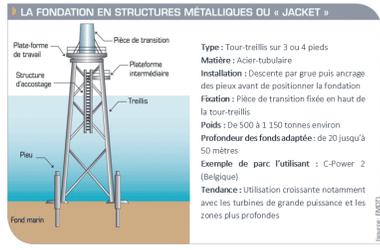
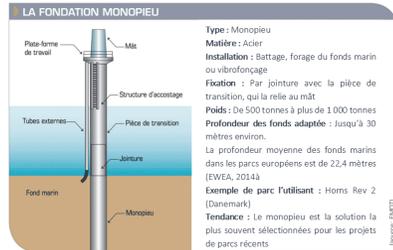
Enjeux

- ❖ En 2022, le parc éolien terrestre français — l'un des plus jeune d'Europe — compte 8 000 à 8 500 (voire 9 000) machines, et près de 14 500 en 2028 pour atteindre les objectifs de la PPE 2019-2028
- ❖ En France, premiers démantèlements en 2010 et, à fin 2022, ≤ 30 parcs éoliens démantelés (190 éoliennes, 200 MW)
- ❖ À partir de 2025 (arrivée en fin de vie), on prévoit démantèlement de 1 GW d'éoliennes par an : ~ 300 éoliennes de 3,6 MW (modèle courant) d'environ 1 500 tonnes => Mt de matériaux à traiter au cours de la décennie

Typologie et composition des éoliennes

Éolien terrestre vs éoliennes offshore

- ❖ Éoliennes terrestres
- ❖ Éoliennes offshore
 - Posé

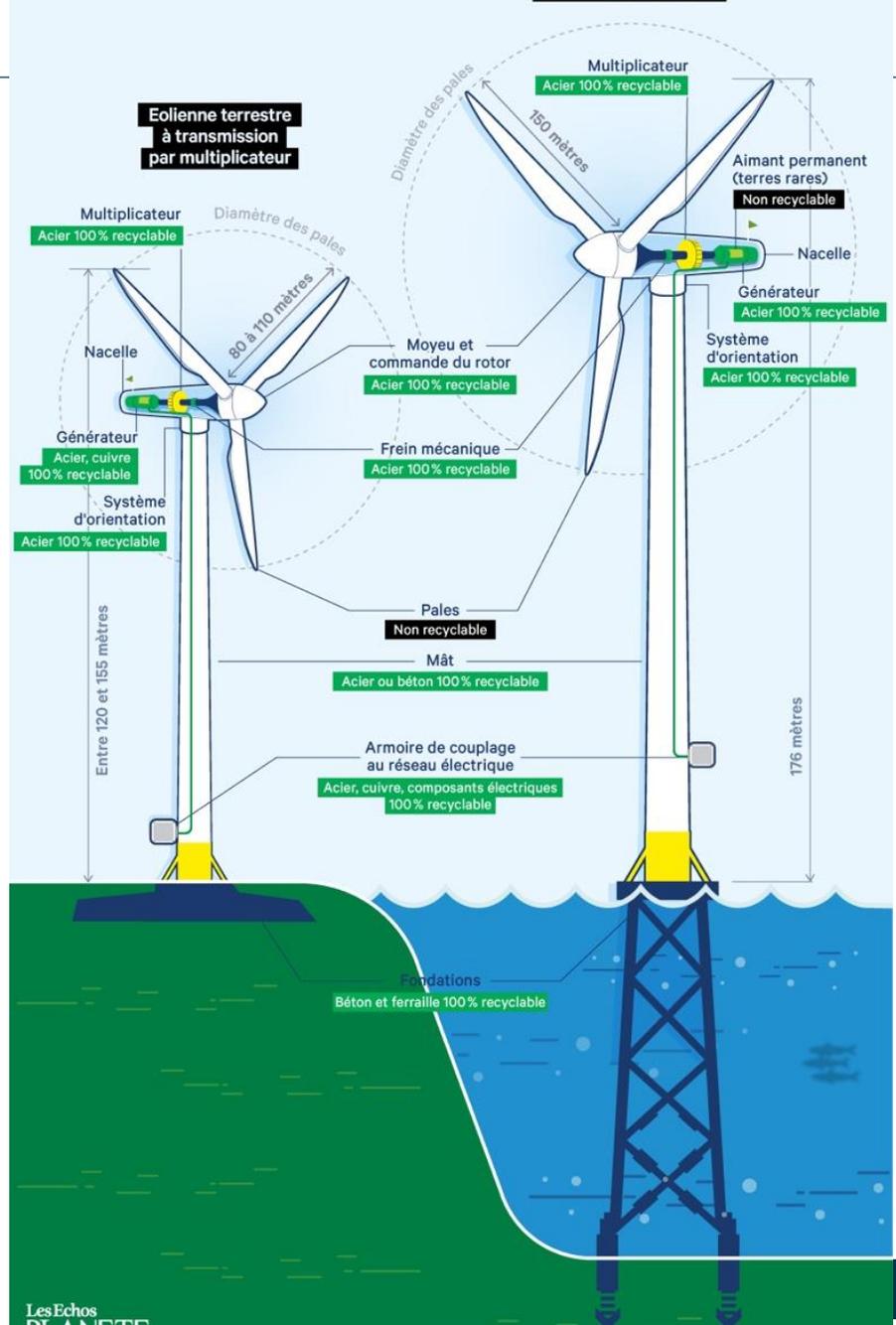


- Flottant



Le recyclage des éoliennes

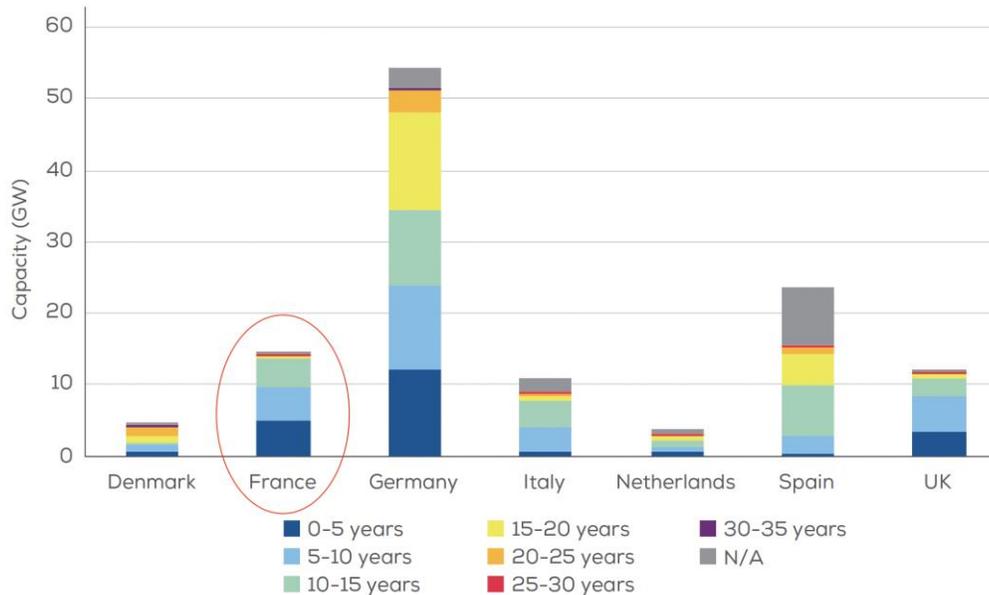
Eolienne maritime à entraînement direct



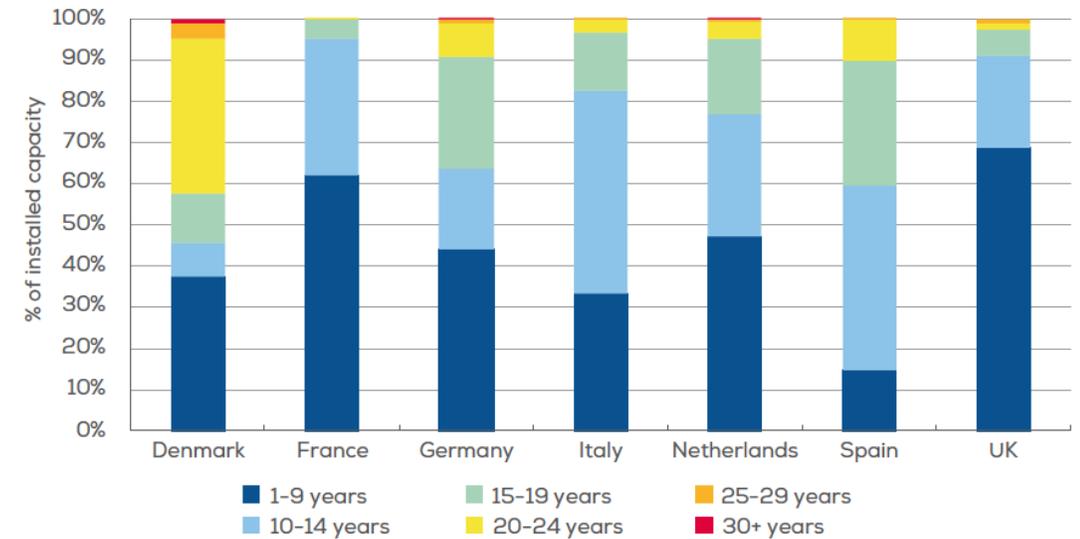
Gisement des éoliennes en fin de vie (1/2)

Le parc éolien terrestre français

❖ Un parc jeune vs autres parcs en Europe



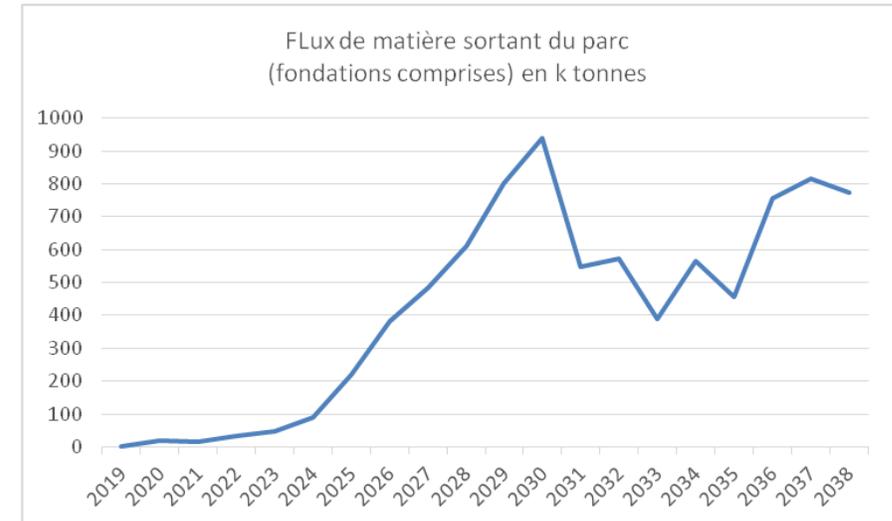
Age distribution of onshore wind capacity in seven European countries



Gisement des éoliennes en fin de vie (2/2)

Flux sortants de matériaux

- ❖ Flux cumulés sur la période 2019-2038 et flux annuels
 - Béton : 6 447 kt/20 ans (hypothèse : excavation totale)
 - Acier : 1 546 kt/20 ans
 - Fonte : 314 kt/20 ans
 - Cuivre : 35 kt/20 ans
 - Aluminium : 29 kt/20 ans
 - Composite : 154 kt/20 ans (~ 2 % masse totale, y c. fondations)
 - Aimants permanents : 330 t/20 ans (36 t en 2030)



| Flux sortants en k tonnes | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 |
|---------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Béton | 3 | 15 | 12 | 26 | 35 | 69 | 167 | 294 | 363 | 459 | 607 | 713 | 419 | 438 | 301 | 425 | 342 | 566 | 613 | 581 |
| Acier | 1 | 3 | 3 | 6 | 8 | 16 | 40 | 64 | 89 | 113 | 142 | 166 | 95 | 99 | 64 | 107 | 86 | 143 | 155 | 147 |
| Fonte | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 8 | 13 | 19 | 24 | 31 | 36 | 21 | 22 | 14 | 20 | 16 | 27 | 29 | 27 |
| Cuivre | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Aluminium | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| Composite | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 4 | 7 | 9 | 12 | 15 | 17 | 10 | 10 | 7 | 10 | 8 | 13 | 14 | 14 |
| Total | 4 | 19 | 16 | 34 | 46 | 90 | 221 | 381 | 484 | 613 | 801 | 939 | 550 | 574 | 389 | 566 | 456 | 754 | 817 | 774 |

Pales : méthodes et procédés (1/2)

Synopsis

- ❖ Les procédés mécaniques (broyage — le plus économique avec l'incinération en cimenteries), thermiques (coprocessing en cimenteries, pyrolyse) et chimiques (solvolyse) sont les plus avancés

| TRL | STRENGTHS | DISADVANTAGES | POINTS OF ATTENTION |
|-------------------------------------|---|---|--|
| Glass fibre: 9 Carbon fibre: 6/7 | <ul style="list-style-type: none"> Efficient and high throughput rates | <ul style="list-style-type: none"> Not competitive (yet) with use of virgin raw materials Quality of recycles compromised due to the high content of other materials Up to 40% material waste generated during grinding, sieving and processing Consequently, large volume applications not (yet) developed | <ul style="list-style-type: none"> Requires dedicated facilities with closed area to limit dust emissions |

Broyage mécanique fin

| TRL | STRENGTHS | DISADVANTAGES | POINTS OF ATTENTION |
|-----|---|---|--|
| 9 | <ul style="list-style-type: none"> Highly efficient, fast and scalable Large quantities can be processed Capability to reduce CO₂ emissions of cement manufacturing by up to 16% Slightly increasing energy efficiency of cement manufacturing No ash left over | <ul style="list-style-type: none"> Loss of original fibre's physical shape | <ul style="list-style-type: none"> Pollutants and particulate matter emissions (although appropriate mitigation exists in compliance with the Industrial Emissions Directive) So far only suitable for glass-reinforced composites |

Coprocessing en cimenteries

| TRL | STRENGTHS | DISADVANTAGES | POINTS OF ATTENTION |
|-----|---|--|--|
| 5/6 | <ul style="list-style-type: none"> More tolerant of contamination Recovery of energy or potential precursor chemicals High efficiency of heat transfer | <ul style="list-style-type: none"> More degradation of fibres than solvolysis/pyrolysis | <ul style="list-style-type: none"> Process-related emissions (although appropriate mitigation exists) Scale-up still needs to be developed |

Gazéification par lit fluidisé

| TRL | STRENGTHS | DISADVANTAGES | POINTS OF ATTENTION |
|-----|--|--|--|
| 6 | <ul style="list-style-type: none"> Potential to be scalable to treat large amounts of waste Low investments required to reach the next TRL | <ul style="list-style-type: none"> Only laboratory- and pilot-scale equipment are available Decreased quality of the recovered glass fibres from original material | <ul style="list-style-type: none"> Size of the available installations might be suboptimal to recycle the current stock of wind turbine |

Courants électriques pulsés

| TRL | STRENGTHS | DISADVANTAGES | POINTS OF ATTENTION |
|--------------------------------|---|---|--|
| Pyrolysis: 9 Microwave: 4/5 | <ul style="list-style-type: none"> The by-products (Syngas and oil) can be used as energy source or as base chemicals/building blocks Easily scaled-up Microwave pyrolysis: Easier to control. Lower damage to the fibre Already used at commercial scale for recycling carbon fibre composites | <ul style="list-style-type: none"> Fibre product may retain oxidation residue or char Loss of strength of fibre due to high temperature Decreased quality of the recovered carbon fibres from original material (lowest value loss in comparison to other mature recycling technologies) | <ul style="list-style-type: none"> Economically sound for carbon fibre recovery to date |

Pyrolyse

| TRL | STRENGTHS | DISADVANTAGES | POINTS OF ATTENTION |
|-----|---|---|---|
| 5/6 | <ul style="list-style-type: none"> Recovery of clean fibres at their full length Soup of resin chemicals produced which can be used as chemical building blocks Low risk solvents are used such as alcohols, glycols and supercritical water | <ul style="list-style-type: none"> High energy consumption due to high temperature and high pressure of some processes Uses large volumes of solvents, although these are mostly recovered and reintegrated into the process Decreased quality of the recovered carbon fibres from original material | <ul style="list-style-type: none"> To date only the carbon fibres are recycled |

Solvolyse

Pales : méthodes et procédés (2/2)

Synthèse

| | RECYCLING TECHNOLOGY | TYPE | MATURITY LEVEL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL) | COST |
|--------------|----------------------------------|--------------------|---|-----------------------------------|
| GLASS FIBRE | Cement co-processing | Thermal | 9 | Low |
| | Mechanical grinding | Mechanical | 9 | Low |
| | High Voltage Pulse Fragmentation | Electro-mechanical | 6 | High investment and running costs |
| CARBON FIBRE | Pyrolysis & Microwave Pyrolysis | Thermal | Pyrolysis: 9 Microwave pyrolysis: 4/5 | High investment and running costs |
| | Solvolyis | Chemical | 5/6 | High investment and running costs |
| | Fluidised Bed | Thermal | 5/6 | High investment and running costs |

Pales : matériaux (1/3)

Résine Elium

- ❖ Résine acrylique thermoplastique développée par la société Arkema et apparue en 2014 dont la faible viscosité initiale et le caractère thermoplastique permettent de concurrencer les résines thermodurcissables en termes de recyclabilité, de mise en œuvre et de propriétés mécaniques qui s'approchent de celles des résines thermodurcissables de type époxy (module d'Young et contrainte à la rupture, respectivement comparables)
- ❖ Historiquement, la résine Elium s'inscrit dans le cadre du projet Effiwind visant à mettre en œuvre des composites à base de polymères thermoplastiques acryliques pour la fabrication de pièces de grandes dimensions pour l'éolien en mer (pales, capots de nacelle)
- ❖ C'est dans le cadre du programme Effiwind qu'a été mise au point en 2018 par Arkema, en partenariat avec la plateforme technologique « composites & matériaux avancés » Canoe (Composites en Aquitaine, Nanostructures OrganiquEs), la résine thermoplastique Elium destinée à la fabrication de pales d'éoliennes recyclables
- ❖ Pour le recyclage, les pièces composites à base de la résine Elium sont grossièrement broyées (traitement mécanique) puis les granulats sont alors dépolymérisés à chaud (traitement thermique) afin de récupérer et purifier la résine dotée des mêmes caractéristiques que la résine vierge (réutilisable en boucle fermée). Les fibres de carbone ou de verre, récupérées également, sont également réutilisables (en boucle ouverte)

Pales : matériaux (2/3)

Projet ZEBRA

- ❖ Résine Elium employée pour la réalisation par LM Wind Power à Ponferrada (Espagne) en mars 2022 d'une pale prototype de 62 mètres entièrement recyclable, dans le cadre du consortium ZEBRA (Zero waste Blade ReseArch), lancé en septembre 2020 pour une période de 42 mois (3,5 ans — fin du projet début 2024) et piloté par l'IRT Jules Verne
- ❖ ZEBRA est un projet de pales d'éoliennes en composites thermoplastiques 100 % recyclables, proposées comme alternative aux pales d'éoliennes en composites thermodurcissables
- ❖ ZEBRA rassemble plusieurs acteurs industriels et centres de recherche au sein d'un consortium (Arkema, Canoe, Engie, LM Wind Power, Owens Corning, Suez)



Pales : matériaux (3/3)

RecyclableBlade

- ❖ L'entreprise Siemens Gamesa (DE/SP), l'un des principaux fabricants d'aérogénérateurs, développe une nouvelle résine pour l'élaboration des pales d'éoliennes, dans le but de permettre leur recyclage par trempage des composites dans un bain d'acide chauffé afin de séparer (et réutiliser) les deux composants (résine et fibres de carbone)

Autres matériaux

- ❖ Vitrimères : matériaux plastiques façonnables à chaud (~ verre) classés entre thermodurcissables et thermoplastiques
- ❖ Polymères autorenforcés : composites polymères simples autorenforcés à matrice thermoplastique SRP (Self-Reinforced Polymers), le renfort fibreux étant une version hautement orientée du même polymère à partir duquel la matrice est fabriquée

Étape 2 – Perspectives d'évolution

1°) Recyclage des pales — 2 axes : méthodes et procédés + matériaux

❖ Etc.

2°) Recyclage des aimants permanents — 2 axes : méthodes et procédés + matériaux

❖ Méthodes et procédés

- Réutilisation directe
- Régénération de l'alliage
- Extraction chimique des terres rares

❖ Matériaux

- Substitution ou réduction des terres rares

Les programmes
RECORD font l'objet
d'un soutien de l'ADEME



Journée de restitution RECORD

Présentation des derniers résultats issus de ses
programmes d'études et de recherche

Les membres de RECORD



23 novembre 2023,
SNCF, Saint Denis

