

**SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT**  
FRANÇAIS / ENGLISH

**RECYCLAGE ET VALORISATION DES COMPOSANTS  
D'EOLIENNES**

ÉTAT DE L'ART TECHNO-ECONOMIQUE ET PERSPECTIVES

***RECYCLING AND RECOVERY OF WIND TURBINE COMPONENTS***  
***A GLOBAL TECHNO-ECONOMIC STATE-OF-THE-ART AND FUTURE PROSPECTS***

**Mai 2024**

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Recyclage et valorisation des composants d'éoliennes. Etat de l'art technico-économique et perspectives, 2024, 186 p, n°22-0923/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 2024

## **RESUME**

En 2024, plus de 9 500 éoliennes terrestres et maritimes sont installées en France. Certains parcs éoliens terrestres français sont arrivés en fin de vie (fin de vie technique ou économique, repowering) et une augmentation massive des opérations de démantèlement est attendue à partir de 2025, générant d'importants flux de matières sortant des parcs mis hors service. Se pose alors la question de la gestion et du devenir des éoliennes démantelées : réemploi, réutilisation, recyclage et valorisation des composants et matériaux font partie des solutions — outre l'élimination. Si certains matériaux issus des éoliennes sont recyclables et valorisables en quasi-totalité dans les filières françaises existantes, plusieurs obstacles demeurent s'agissant du recyclage des pales, à base de matériaux composites, et du recyclage des aimants permanents, contenant des terres rares.

Cette étude réalise un état des lieux du développement dans le monde des technologies de recyclage et de valorisation des différents composants d'éoliennes.

Dans un premier temps, un état de l'art technico-économique de la filière de fin de vie des éoliennes est réalisé en France, en Europe (Allemagne, Pays-Bas, Danemark, etc.) et à l'échelle mondiale (États-Unis). Cet état de l'art examine différentes dimensions : gisements et devenir des éoliennes, dispositifs législatifs et réglementaires, chaîne de valeur de la filière, aspects opérationnels et techniques autour du démantèlement et des opérations de tri, transport et logistique post-démantèlement, technologies et procédés de recyclage et de valorisation des pales déjà opérationnels (recyclage mécanique, chimique par pyrolyse, chimique par solvolysse, valorisation énergétique/matière comme combustibles solides de récupération, incinération), viabilité économique.

Dans un second temps, pour les pales et les aimants permanents, sont examinées les évolutions possibles s'agissant d'une part des procédés et technologies de recyclage et, d'autre part, de la mise en œuvre de matériaux innovants et écoconçus. Pour les pales, des procédés inédits, non encore matures ont été décrits (gazéification par lit fluidisé, pyrolyse assistée par micro-ondes, courants électriques pulsés, pyrolyse par plasma, vapopyrolyse/vapothermolyse, solvolysse hautes ou basses température et pression), ainsi que des matériaux nouveaux (résine thermoplastique Elium et projet ZEBRA, RecyclableBlade, vitrimères, polymères autoreforçés). Pour les aimants permanents, des procédés ont également été décrits (réutilisation directe, recyclage en boucle courte magnet-to-magnet, recyclage en boucle longue aboutissant à l'extraction des terres rares par voie chimique — les deux derniers procédés sont non matures), ainsi que des travaux encore au stade de la recherche sur l'opportunité de remplacer les terres rares ou d'en réduire la teneur.

## **MOTS CLES**

fin de vie, éolienne, gisement, démantèlement, réemploi, réutilisation, recyclage, valorisation, élimination, pale, matériaux composites, aimant permanent, terres rares, réglementation

---

## **SUMMARY**

More than 9,500 onshore and maritime wind turbines are installed in France. Some French onshore wind farms have reached the end of their life (end of technical or economic life, repowering) and a massive increase in dismantling operations is expected from 2025, generating significant flows of materials. The question then arises of the management and future of dismantled wind turbines: reuse, recycling and recovery of components and materials are part of the solutions — in addition to elimination. Although certain materials from wind turbines are almost entirely recyclable and recoverable in existing sectors, several obstacles remain when it comes to the recycling of blades, based on composite materials, and the recycling of permanent magnets, containing rare earths.

This study provides an overview of the development in the world of recycling and recovery technologies for different wind turbine components.

Firstly, a state of the technico-economic art of the wind turbine end-of-life sector is carried out in France, in Europe (Germany, Netherlands, Denmark, etc.) and on a global scale (mainly USA). This state of the art examines different dimensions: deposits and future of wind turbines, legislative and regulatory systems, value chain of the sector, operational and technical aspects around dismantling and sorting operations, transport and post-dismantling logistics, technologies and recycling and recovery processes for blades already operational (mechanical recycling, chemical recycling by pyrolysis, chemical recycling by solvolysis, energy/material recovery as solid recovered fuels, incineration), economic viability.

Secondly, for blades and permanent magnets, possible developments are examined regarding, on the one hand, recycling processes and technologies and, on the other hand, the implementation of innovative and eco-designed materials. For blades, new processes, not yet mature, have been described (fluidized bed gasification, microwave-assisted pyrolysis, pulsed electric currents, plasma pyrolysis, vapopyrolysis/vapothermolysis, high or low temperature and pressure solvolysis), as well as new materials (Elium thermoplastic resin and ZEBRA project, RecyclableBlade, vitrimers, self-reinforced polymers). For permanent magnets, processes have also been described (direct reuse, short magnet-to-magnet loop recycling, long loop recycling leading to the extraction of rare earths by chemical means — the last two processes are not mature), as well as work still at the research stage on the possibility of replacing rare earths or reducing their content.

## **KEY WORDS**

end of life, wind turbine, deposit, dismantling, reuse, recycling, recovery, elimination, blade, composite materials, permanent magnet, magnet, rare earths, regulations

## Contexte de l'étude

Alors que les premiers parcs éoliens terrestres installés en France arrivent en fin de vie et qu'une augmentation massive des opérations de démantèlement est attendue à partir de 2025, à l'origine d'importants flux de matières, se pose la question de la gestion et du devenir des éoliennes démantelées : réemploi, réutilisation, recyclage et valorisation des composants et matériaux font partie des options — outre l'élimination, solution la moins souhaitable.

Si certains matériaux issus des éoliennes sont recyclables et valorisables dans les filières françaises existantes, plusieurs défis demeurent s'agissant notamment du recyclage des pales, à base de matériaux composites, et du recyclage des aimants permanents contenant des terres rares. Nombre de développements sont en cours concernant le démantèlement, le recyclage et l'écoconception de ces différents composants et matériaux.

## Objectif et plan de l'étude

Dans ce contexte et au regard de ces enjeux, l'association RECORD a engagé une étude relative au recyclage et à la valorisation des composants d'éoliennes, visant à établir un état de l'art technico-économique et les perspectives associées.

Dans un premier temps (étape 1), l'étude dresse un état de l'art technico-économique de la filière de fin de vie des éoliennes aux échelles française, européenne et mondiale. Cet état de l'art aborde différentes dimensions : gisements et devenir des éoliennes, dispositifs législatifs et réglementaires, chaîne de valeur de la filière, aspects opérationnels et techniques autour du démantèlement et des opérations de tri, transport et logistique post-démantèlement, technologies et procédés de recyclage et de valorisation des pales déjà opérationnels, viabilité économique.

Dans un second temps (étape 2), et ce spécifiquement pour les pales et les aimants permanents, l'étude examine les évolutions possibles s'agissant d'une part des procédés et technologies de recyclage et, d'autre part, de la mise en œuvre de matériaux innovants et écoconçus. Pour les pales, des procédés inédits, non encore matures, sont décrits, ainsi que des matériaux nouveaux, présentant potentiellement une plus grande recyclabilité. Pour les aimants permanents, des procédés sont également décrits (pour l'essentiel non matures), ainsi que des travaux encore au stade de la recherche sur l'opportunité de remplacer les terres rares ou d'en réduire la teneur.

Une dernière étape (étape 3) présente une synthèse conclusive présentant les principaux enseignements de l'étude rassemblés dans une matrice SWOT. Dans une logique de structuration de filière, il est proposé que ces éléments de diagnostic servent de données d'entrée à des travaux futurs, visant à définir des orientations stratégiques possibles assorties de leviers et pistes d'actions.

## Résultats et discussion

### État de l'art technico-économique

L'analyse réalisée en France fait apparaître un gisement d'éoliennes en fin de vie allant croissant à partir de 2025, pour atteindre près de 1 Mt de matières vers 2030 puis oscillant entre 0,5 et 1 Mt pendant la décennie suivante. Dans d'autres géographies en Europe (Allemagne, Pays-Bas, Danemark, etc.) et dans le monde (États-Unis), les opérations de démantèlement de parcs éoliens — pour l'essentiel terrestres — ont commencé depuis quelques années déjà. Les gisements français de déchets de matériaux composites issus des

## Study context

*While the first onshore wind farms installed in France are reaching the end of their life and a massive increase in dismantling operations is expected from 2025, causing significant flows of materials, the question of management and becoming of dismantled wind turbines arises: reuse, recycling and recovery of components and materials are among the options — apart from elimination, the least desirable solution.*

*Even so certain materials from wind turbines are recyclable and recoverable in existing French sectors, several challenges remain, particularly with regard to the recycling of blades, based on composite materials, and the recycling of permanent magnets containing rare earths. A number of developments are underway concerning the dismantling, recycling and eco-design of these different components and materials.*

## Objectives and study plan

*In this context and with regard to these issues, RECORD has initiated a study relating to the recycling and recovery of wind turbine components, aiming to establish a state of the technico-economic art and the associated perspectives.*

*Firstly (step 1), the study draws up a state of the technical and economic art of the wind turbine end-of-life sector on the French, European and global scales. This state-of-the-art addresses different dimensions: deposits and future of wind turbines, legislative and regulatory frames, value chain of the sector, operational and technical aspects around dismantling and sorting operations, transport and post-dismantling logistics, technologies and blade recycling and recovery processes already operational, economic viability.*

*Secondly (step 2), and specifically for blades and permanent magnets, the study examines possible developments with regard to recycling processes and technologies on the one hand and, on the other hand, the implementation using innovative and eco-designed materials. For blades, new processes, not yet mature, are described, as well as new materials, potentially presenting greater recyclability. For permanent magnets, processes are also described (mostly not mature), as well as work still at the research stage on the opportunity to replace rare earths or reduce their content.*

*A final step (step 3) presents a conclusive summary presenting the main lessons of the study gathered in a SWOT matrix. In a logic of sector structuring, it is proposed that these diagnostic elements serve as input data for future work, aimed at defining possible strategic orientations accompanied by levers and avenues of action.*

## Results and discussion

### State of the technico-economic art

*The analysis carried out in France reveals a deposit of wind turbines at the end of their life increasing from 2025, reaching almost 1 Mt of materials around 2030 then oscillating between 0.5 and 1 Mt during the following decade. In other regions in Europe (Germany, Netherlands, Denmark, etc.) and around the world (United States), operations to dismantle wind farms — mainly land-based — have started for several years already. French deposits of composite material waste from onshore wind turbines at the end of their life are well mapped, with volumes capable of supplying a recycling sector from 2025. Conversely, French deposits of permanent magnets based on rare earths appear*

éoliennes terrestres en fin de vie sont bien cartographiés, avec des volumes à même d'alimenter une filière de recyclage dès 2025. À l'inverse, les gisements français d'aimants permanents à base de terres rares apparaissent limités pendant 20 ans, car seules 5 % des éoliennes terrestres françaises en sont équipées et le démantèlement des éoliennes marines n'interviendra pas avant 2040.

S'agissant du devenir des éoliennes mises hors service, il existe un marché européen voire extra-européen du réemploi (machines d'occasion, pièces détachées) et de la réutilisation (nouveaux usages des pales) permettant de temporiser et différer les étapes de recyclage (recycling) et de valorisation (recovery) en évitant autant que possible élimination par incinération sans valorisation énergétique et/ou mise en décharge (disposal). Mais ces marchés ne sont pas en mesure d'absorber la totalité des éoliennes en fin de vie, de sorte que le recyclage et la valorisation à grande échelle apparaissent inéluctables.

La législation et la réglementation relatives à la fin de vie des éoliennes est marquée par une évolution vers un cadre structurant pour le démantèlement et le recyclage des éoliennes hors d'usage. La politique de l'Union européenne en matière de déchets est de haut niveau et les exigences réglementaires spécifiques à l'éolien sont fixées aux niveaux national, régional, voire local (démantèlement des machines et fondations, gestion des déchets, remise en état des sites). Pour pallier l'absence de norme industrielle internationale régissant la mise hors service et le démantèlement des éoliennes terrestres et contribuer à l'élaboration d'une telle norme, WindEurope (Task Force for Dismantling and Decommissioning lancée dans le but d'harmoniser les normes nationales qui s'appliquent à la mise hors service et au démantèlement des éoliennes) a présenté en 2020 un document d'orientation de l'industrie pour le démantèlement des éoliennes terrestres et soumis ce guide à l'International Electrotechnical Commission (IEC — Technical Committee TC 88 for wind energy generation systems) en vue de contribuer à l'amendement de la spécification technique 61400-28 CD relative à la fin de vie des éoliennes. En France, les prescriptions techniques applicables aux activités de démantèlement des éoliennes en fin de vie sont régies par l'arrêté (modifié) du 26 août 2011 et les opérations de démantèlement et de remise en état sont prévues à l'article R515-106 du Code de l'environnement. En revanche, si en France (Code de l'environnement, loi Agec) comme en Europe (directive-cadre européenne 2008/98/CE relative aux déchets), la gestion de la plupart des déchets fait l'objet d'une législation et d'une réglementation précise (déchets de béton, de métaux, de câbles électriques, d'huiles usagées), il n'existe que peu d'exigences réglementaires pour les déchets de composites en France comme en Europe (classification variable des déchets de composites entraînant une diversification des flux de déchets au détriment d'un flux unique), de même qu'il n'existe pas (encore) de législation européenne ou nationale spécifique relative aux terres rares — dans ce dernier cas la situation évolue car la Commission européenne a présenté en mars 2023 sa stratégie pour sécuriser les chaînes d'approvisionnement en matières premières critiques et stratégiques CRMA (Critical Raw Materials Act) et le 18 mars 2024 le Conseil de l'Union européenne a donné son [approbation](#) au règlement sur les matières premières critiques.

En France, des acteurs industriels de toutes tailles sont présents sur la plupart des maillons de la chaîne de valeur de la filière de fin de vie des éoliennes (démantèlement, tri, transport et logistique post-démantèlement, réemploi, réutilisation, recyclage et valorisation). Mais les entreprises de cet écosystème doivent faire face à une forte concurrence

*limited for 20 years, because only 5% of French onshore wind turbines are equipped with them and the dismantling of marine wind turbines will not take place before 2040.*

*Concerning the future of decommissioned wind turbines, there is a European or even extra-European market for reuse (second-hand machines, spare parts) and reuse (new uses of blades) making it possible to delay and postpone the recycling and recovery stages, avoiding as much as possible elimination by incineration without energy recovery and/or landfill disposal. But these markets are not able to absorb all the wind turbines at the end of their life, so that large-scale recycling and recovery appear inevitable.*

*Legislation and regulations relating to the end of life of wind turbines are marked by an evolution towards a structuring framework for the dismantling and recycling of end-of-use wind turbines. The European Union's waste policy is high-level and regulatory requirements specific to wind power are set at national, regional and even local levels (dismantling of machines and foundations, waste management, site restoration). To compensate for the lack of an international industrial standard governing the decommissioning and dismantling of onshore wind turbines and contribute to the development of such a standard, WindEurope (Task Force for Dismantling and Decommissioning launched with the aim of harmonizing national standards which apply to the decommissioning and dismantling of wind turbines) presented an industry guidance document for the decommissioning of onshore wind turbines in 2020 and submitted this guidance to the International Electrotechnical Commission (IEC — Technical Committee TC 88 for wind energy generation systems) with a view to contributing to the amendment of technical specification 61400-28 CD relating to the end of life of wind turbines.*

*In France, the technical requirements applicable to dismantling activities for wind turbines at the end of their life are governed by the (amended) decree of August 26, 2011 and dismantling and restoration operations are provided for in article R515-106 of the Environmental Code. On the other hand, if in France (Environmental Code, Agec law) as in Europe (European framework directive 2008/98/EC relating to waste), the management of most waste is the subject of legislation and of precise regulations (waste of concrete, metals, electrical cables, used oils), there are few regulatory requirements for composite waste in France as in Europe (variable classification of composite waste leading to a diversification of waste streams to the detriment of a single stream), just as there is (yet) no specific European or national legislation relating to rare earths — in the latter case the situation is evolving because the European Commission presented in March 2023 its strategy to secure supply chains for critical and strategic raw materials CRMA (Critical Raw Materials Act) and on March 18, 2024 the Council of the European Union gave its [approval](#) to the regulation on critical raw materials.*

*In France, industrial players of all sizes are present in most links in the value chain of the wind turbine end-of-life sector (dismantling, sorting, transport and post-dismantling logistics, reuse, recycling and recovery). But companies in this ecosystem must face strong foreign competition, particularly in Europe where sectors for dismantling and recycling end-of-life wind turbines are already well established in countries active in onshore wind power (Netherlands, Denmark, Germany, Spain) but also for installed offshore wind power (Germany, Belgium, Denmark, Norway, Netherlands, United Kingdom).*

étrangère, notamment en Europe où des filières de démantèlement et de recyclage des éoliennes hors d'usage sont déjà bien établies dans des pays actifs pour l'éolien terrestre (Pays-Bas, Danemark, Allemagne, Espagne) mais aussi pour l'éolien offshore posé (Allemagne, Belgique, Danemark, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni).

Pour les pales en matériaux composites, des technologies et procédés de recyclage et de valorisation sont déjà opérationnels — recyclage mécanique, recyclage chimique par pyrolyse ou par solvolysse, valorisation énergétique/matière comme combustibles solides de récupération, incinération. Les deux technologies les plus couramment employées (les plus matures et économiquement abordables/viables) sont le broyage mécanique fin (valorisation matière mais qualité des recyclats médiocre et débouchés limités) et l'incinération dans les cimenteries ou coprocessing (valorisation matière et énergétique comme combustibles solides de récupération mais fibres de verre perdues et compétition avec d'autres filières utilisatrices de composites). Mais ces méthodes permettront seulement d'absorber les flux sortants des parcs éoliens durant la phase transitoire où ces flux sont encore limités (volumes, temporalité, synergies avec d'autres filières), préalablement à la structuration et l'industrialisation d'une filière de recyclage à proprement parler et selon un modèle économique adapté. D'où une certaine incertitude sur les capacités industrielles de recyclage et de valorisation des pales. Les aimants permanents à base de terres rares peuvent faire l'objet d'une réutilisation directe après reconditionnement des aimants, mais avec la limitation indiquée ci-avant concernant les gisements.

Un autre point de vigilance concerne la viabilité économique de la filière de fin de vie des éoliennes. En 2023, au regard des volumes traités, de la valeur créée et des variations des cours des matériaux/matières, la rentabilité opérationnelle de l'activité de recyclage des éoliennes en fin de vie est faible, voire négative — écart entre le coût des opérations de démantèlement (coûts du chantier de démantèlement par ex. équipements, main d'œuvre, prétraitement sur site, coûts d'élimination des divers matériaux par ex. composites, bétons) et de recyclage d'une part et, d'autre part, le produit que peut en retirer le recycleur (montant facturé à l'exploitant du parc, vente de machines entières, vente de pièces détachées, vente des métaux ferreux et non ferreux, vente des granulats béton, vente des divers matériaux par exemple fibres de verre ou de carbone, terres rares, CSR). Dans le cas particulier des pales et des aimants permanents, respectivement, les matériaux composites issus des éoliennes en fin de vie seront majoritairement à base de fibres de verre jusqu'en 2035-2040, les renforts à base de fibres de carbone (valeur supérieure) n'ayant été utilisés qu'à partir de 2015 ; quant aux aimants, moins de 1 % de l'ensemble des aimants permanents usagés sont aujourd'hui recyclés selon cette [étude](#) de 2022.

Enfin, un dernier point de vigilance concerne les impacts environnementaux et sanitaires de la filière de fin de vie des éoliennes, en particulier s'agissant des pales. En milieu extérieur, les retours d'experts comme une revue d'Internet indiquent qu'il n'existe que peu voire pas de prise en compte des problèmes d'émissions de poussières (broyage, découpe à la scie, découpe à la pince) ou de dégagements de fumées (découpe au chalumeau) lors de la manipulation et du traitement des pales, ni de mesures de protection contre le bruit.

### **Évolutions attendues pour les pales et les aimants permanents**

Pour les pales, outre les solutions déjà industrialisées ou en cours d'industrialisation (cf. supra), des procédés et technologies de recyclage et valorisation innovants font l'objet

*For composite material blades, recycling and recovery technologies and processes are already operational — mechanical recycling, chemical recycling by pyrolysis or solvolysis, energy/material recovery as solid recovery fuels, incineration. The two most commonly used technologies (the most mature and economically affordable/viable) are fine mechanical grinding (material recovery but poor quality of recyclates and limited outlets) and incineration in cement plants or coprocessing (material and energy recovery as solid recovered fuels but lost glass fibers and competition with other sectors using composites). But these methods will only make it possible to absorb the outgoing flows from wind farms during the transitional phase where these flows are still limited (volumes, temporality, synergies with other sectors), prior to the structuring and industrialization of a sector of recycling strictly speaking and according to an adapted economic model. Hence a certain uncertainty about the industrial capacities for recycling and recovery of blades. Permanent magnets based on rare earths can be directly reused after reconditioning the magnets, but with the limitation indicated above concerning the deposits.*

*Another point of vigilance concerns the economic viability of the wind turbine end-of-life sector. In 2023, in view of the volumes processed, the value created and the variations in the prices of materials, the operational profitability of the activity of recycling wind turbines at the end of their life is low, even negative - difference between the cost of operations dismantling (costs of the dismantling site e.g. equipment, labor, pre-treatment on site, costs of disposal of various materials e.g. composites, concrete) and recycling on the one hand and, on the other hand, the product that the recycler can obtain from it (amount invoiced to the park operator, sale of entire machines, sale of spare parts, sale of ferrous and non-ferrous metals, sale of concrete aggregates, sale of various materials, for example fiberglass or carbon, rare earths, SRF). In the particular case of blades and permanent magnets, respectively, composite materials from wind turbines at the end of their life will be mainly based on glass fibers until 2035-2040, reinforcements based on carbon fibers (higher value) having only been used from 2015; as for magnets, less than 1% of all used permanent magnets are today recycled according to this 2022 [study](#).*

*Last, a final point of vigilance concerns the environmental and health impacts of the end of life of wind turbines, in particular with regard to the blades. In the outdoor environment, feedback from experts such as an Internet review indicates that there is little or no consideration of dust emission problems (grinding, saw cutting, plier cutting) or smoke releases (torch cutting) during the handling and processing of the blades, nor noise protection measures.*

### **Expected developments for blades and permanent magnets**

*For blades, in addition to solutions already industrialized or in the process of being industrialized (see above), innovative recycling and recovery processes and technologies are the subject of exploratory work, in particular gasification by fluidized bed, microwaves-assisted pyrolysis, high voltage fragmentation based on the use of pulsed electric currents, plasma pyrolysis, vapopyrolysis/vapothermolysis, as well as high or low temperature and pressure solvolysis. These alternative solutions, applied alone or in combination, present different levels of technological maturity (industrialization), vary in their effects on the quality of the fibers (glass or carbon) at the end of the process — which influences or determines the way in which the recyclates can be reused. The orientation towards a given recycling technology depends on the nature of the different*

de travaux exploratoires, en particulier la gazéification par lit fluidisé, la pyrolyse assistée par micro-ondes, la fragmentation à haute tension fondée sur l'emploi de courants électriques pulsés, la pyrolyse par plasma, la vapopyrolyse/vapothermolyse, ainsi que la solvolysse hautes ou basses température et pression. Ces solutions alternatives, appliquées seules ou en combinaison, présentent différents niveaux de maturité technologique (industrialisation), varient dans leurs effets sur la qualité des fibres (verre ou carbone) en sortie de procédé — ce qui influence ou détermine la manière dont les recyclats peuvent être réutilisés. L'orientation vers une technologie de recyclage donnée dépend de la nature des différents constituants du matériau (matrice, renforts) ou de l'application visée pour l'utilisation du recyclat.

Pour les pales également, d'autres percées sont attendues concernant l'emploi de matériaux innovants et écoconçus, potentiellement dotés d'une plus grande recyclabilité : résine thermoplastique Elium et projet ZEBRA, RecyclableBlade, vitrimères, polymères autoreforçés, etc. Avec des acteurs de premier plan (IRT Jules Verne, Arkema, Canoe, Engie, Suez), la France est présente sur le projet ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch). Toutefois, la France est quasi absente des grands programmes de R&D européens (Horizon 2020, Horizon Europe) relatifs aux technologies et procédés de recyclage et valorisation des pales. À surveiller : des projets qui visent à développer des solutions applicables aux pales actuellement en service et à d'autres industries utilisatrices de composites thermodurcissables — CETEC (chimiolyse), DecomBlades (pyrolyse).

Pour les aimants permanents, les perspectives portent principalement sur le recyclage en boucle courte (régénération de l'alliage magnétique) et le recyclage en boucle longue (extraction des terres rares par voie chimique), ainsi que sur la possibilité de réduire la teneur des terres rares utilisées. Ces différentes voies sont encore à un stade amont. La France dispose d'expertises avec le CEA-Liten, quelques entreprises et le projet MAGNOLIA (MAGNets on piOt LIne Ambition — projet qui vise à structurer en France une filière industrielle de recyclage et de fabrication d'aimants permanents frittés), principalement sur la boucle courte, également sur la boucle longue mais dans une moindre mesure. La France est par ailleurs présente dans quelques grands programmes de R&D européens (Horizon 2020, etc.).

## Conclusions

La grande diversité de formes (structures) et de compositions (chimies) des pales en matériaux composites et des aimants à base de terres rares est actuellement un frein à un recyclage efficient et massif de ces composants. L'hétérogénéité des gisements reflète la diversité des constructeurs/fabricants/équipementiers entraînant l'absence de standardisation (design/conception) et de traçabilité des composants.

Dans ce contexte, outre les avancées prévisibles ou attendues s'agissant du traitement des pales et des aimants permanents, la réglementation joue un rôle majeur pour inciter les fabricants de turbines à améliorer la circularité de la filière en rationalisant et optimisant les opérations (démantèlement, tri/transport/logistique, technologies et procédés de recyclage) et, au-delà, favoriser des convergences interfilières (gisements avec des origines et usages différents — composites, aimants). Car pour l'heure, le traitement des déchets tout-venant — massification des gisements — n'est pas envisageable (nécessaire séparation des flux de matières/déchets à recycler).

*constituents of the material (matrix, reinforcements) or the intended application for the use of the recyclate.*

*For blades also, other breakthroughs are expected concerning the use of innovative and eco-designed materials, potentially with greater recyclability: Elium thermoplastic resin and ZEBRA project, RecyclableBlade, vitrimers, self-reinforced polymers, etc. With leading players (IRT Jules Verne, Arkema, Canoe, Engie, Suez), France is present on the ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch) project. However, France is almost absent from major European R&D programs (Horizon 2020, Horizon Europe) relating to blade recycling and recovery technologies and processes. To watch carefully: projects that aim to develop solutions applicable to blades currently in service and to other industries using thermosetting composites — CETEC (chemolysis), DecomBlades (pyrolysis).*

*For permanent magnets, the outlook mainly concerns short-loop recycling (regeneration of the magnetic alloy) and long-loop recycling (chemical extraction of rare earths), as well as the possibility of reducing the rare-earth content. These different pathways are still at an early stage. France has expertise with the CEA-Liten, a few companies and the MAGNOLIA project (MAGNets on piOt LIne Ambition — project which aims to structure in France an industrial sector for recycling and manufacturing sintered permanent magnets), mainly on the short loop, also on the long loop but to a lesser extent. France is also present in some major European R&D programs (Horizon 2020, etc.).*

## Conclusions

*The great diversity of shapes (structures) and compositions (chemistries) of blades made of composite materials and magnets based on rare earths is currently an obstacle to efficient and widespread recycling of these components. The heterogeneity of the deposits reflects the diversity of constructors/manufacturers/equipment suppliers leading to the absence of standardization (design/conception) and traceability of components.*

*In this context, in addition to the foreseeable or expected advances in the processing of blades and permanent magnets, regulations play a major role in encouraging turbine manufacturers to improve the circularity of the sector by rationalizing and optimizing operations (dismantling, sorting/transport/logistics, recycling technologies and processes) and, beyond that, promoting inter-industry convergences (repositories with different origins and uses — composites, magnets). Because for the moment, the treatment of waste from all sources - massification of deposits - is not possible (necessary separation of flows of materials/waste to be recycled).*