



**PRÉFÈTE
DE LA RÉGION
AUVERGNE-
RHÔNE-ALPES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Tenerdis
Auvergne-Rhône-Alpes



Fiche Thématique Economie Circulaire de l'éolien

Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement
Auvergne-Rhône-Alpes


eauairsolenergie

Janvier 2023

Tenerdis

Sommaire

Propos Introductifs

Etat des lieux et dynamique de la filière en Région AURA

Quelles fins de vie pour les éoliennes ?

Les enjeux de la recyclabilité : s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire

Des projets de démantèlement et de recyclage de parcs éoliens en France

1- Les retours d'expériences de projets concrets

- a- Le projet de démantèlement du parc éolien de Port-La-Nouvelle**
- b- Le projet ZEBRA - Zero Waste Blade Research Project
(fabrication de la première pale en matériaux composites)**
- c- Le projet de Rivesaltes – un autre projet de repowering exemplaire**

2- Le projet de recherche FUI 25 FEDRE – Fondation d'Eoliennes Durable avec REpowering

Propos introductifs

La PPE sur le volet éolien

terrestre :

Puissance installée

x2 en 10 ans

de 15 GW en 2018

à 33,2 – 34,7 GW en 2028

La France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone à 2050 pour s'inscrire dans la trajectoire d'émissions de GES compatible avec l'objectif de maintenir le réchauffement planétaire en dessous de +2°C.

Deux outils de cadrage de la trajectoire vers la neutralité carbone sont mis en place : la **Stratégie nationale bas carbone** et la **Programmation pluriannuelle de l'énergie**. La première donne des orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activités, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable.

En parallèle d'un renforcement massif des mesures de sobriété et d'efficacité énergétique pour une baisse de la consommation finale d'énergie de -7% à 2023 et de -14% à 2028, la PPE actuelle fixe quant à elle les priorités nationales d'évolution du mix énergétique pour deux périodes de 5 ans (2019-2023 et 2024-2028). L'éolien est appelé à jouer un rôle de premier plan dans ce nouveau mix énergétique qui devra couvrir des besoins nouveaux liés à l'électrification croissante des usages : développement du numérique, mobilité électrique décarbonée, transformation dans les process industriels mais également permettre d'accroître notre indépendance énergétique.

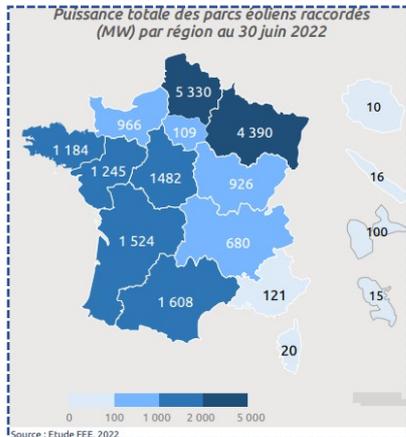
Atteindre les objectifs éoliens projetés par la PPE, ou régionalement par le SRADDET, implique une action cohérente, coordonnée et efficace de l'ensemble des acteurs de l'énergie en région et un **développement de projets tenant compte, de manière proportionnée, de l'ensemble des enjeux** du territoire sur lequel ils s'insèrent.

Des objectifs ambitieux pour des bénéfices multiples

- limiter les émissions de CO2 et respecter l'engagement de neutralité carbone dans le cadre de la lutte contre le changement climatique dont les effets méritent d'être mis en regard de ceux des parcs éoliens
- garantir une source d'énergie locale et accroître l'indépendance énergétique
- contribuer à l'économie et aux ressources des territoires : soutien à l'emploi local, production d'une énergie locale et contribution à la réalisation d'autres projets locaux au bénéfice des citoyens grâce à la fiscalité apportée.

Etat des lieux et dynamique de la filière en Région AURA

La Région Auvergne Rhône-Alpes en retard



Il est aujourd'hui indiscutable que **l'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable incontournable pour la décarbonation**. Les objectifs de la France : neutralité carbone à atteindre d'ici 2050 et accroissement de son indépendance énergétique, ne pourront se réaliser sans la participation de l'éolien dans le mix énergétique, et plus précisément dans le mix électrique qui devra couvrir de nouveaux besoins liés à l'électrification des usages.

Malgré ce constat, **la France accuse un retard** dans les objectifs définis par la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) pour l'éolien terrestre. Elle fixe les objectifs de transition énergétique du pays jusqu'en 2028 avec une capacité de l'énergie éolienne à atteindre de **24,1 GW en 2023 et de 33,2 à 34,7 GW en 2028**. Or, fin 2021, la France réalise seulement **77,9% de l'objectif de 2023** avec **18,7 GW** de puissance installée.

La Région Auvergne Rhône-Alpes se classe au 10^{ème} rang des régions françaises avec à peine 700 MW de puissance éolienne en exploitation pour un objectif de 2500 MW à atteindre en 2030 (fixé par le SRADDET). Le retard à combler est important comparé aux régions du Nord de la France qui ont déjà dépassé leurs objectifs. (Source DREAL et FEE).

Plus de 2500 MW d'éolien d'ici 2030 :

C'est l'objectif que s'est fixé la Région dans le cadre de son Schéma Régional de Développement Durable et d'Egalité des Territoires (SRADDET).

Pendant, des disparités géographiques sont notables, les départements de l'Ardèche, de la Drôme et de du Cantal enregistrent le parc le plus important. L'Allier comptabilise également de plus en plus de projets éoliens en développement.

Concernant la répartition géographique, **l'éolien terrestre reste concentré dans un tout petit nombre de territoires**. Pour poursuivre son développement, il est donc nécessaire d'« ouvrir le jeu parce qu'on a concentré l'implantation sur très peu de territoires » (discours du Président de la République lors de l'inauguration du Parc éolien en mer de Saint-Nazaire -22/09/2022). Libérer de l'espace (des zones saturées en éoliennes), mieux répartir dans une logique de rééquilibrage, en s'appuyant notamment sur une logique **d'économie circulaire (démontage, réutilisation, recyclage)**, car beaucoup de parcs éoliens commencent à atteindre leur fin de vie : la durée de vie moyenne d'une éolienne est de 30 ans.

Quelle fin de vie pour les éoliennes ?

Les enjeux de la recyclabilité : s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire

Le Code de l'Environnement et l'arrêté du 26 août 2011 modifié, encadrent la fin de vie des machines et fixent les objectifs de démontage et de recyclage des éoliennes.

Aujourd'hui :

La totalité des fondations doit être excavée, 90% de l'éolienne et 35% du rotor doivent être recyclés.

A partir de 2023 et progressivement jusqu'en 2025, 95% de l'éolienne et 55% du rotor devront être recyclés.

Chaque étape de démontage (démantèlement) et de recyclage des installations éoliennes est encadrée par la loi.

Plusieurs possibilités ont été identifiées par l'ADEME pour réduire les impacts environnementaux des éoliennes en fin de vie :

- **Le démantèlement simple** : démantèlement de tout ou partie du parc éolien et remise en état du site (exemple : parc éolien de **Port-La-Nouvelle** opéré par **ENGIE** – cf ci-après).
- **Le repowering** (ou renouvellement intégral du parc) : on démantèle les éoliennes sur site pour les remplacer par de nouvelles plus performantes, capables de générer plus d'électricité.
- et **le revamping** : c'est le changement et l'optimisation de certaines pièces de l'éolienne, comme par exemple, les pales, de parcs déjà en service et en fin de vie qui permettent aussi d'augmenter la puissance de l'éolienne déjà installée.

La question du recyclage des éoliennes en fin de vie se pose également.

Les enjeux du recyclage :

- Aujourd'hui, **une éolienne est recyclable à plus de 90%** : la fondation et le mât sont constitués en majorité d'acier et de béton, matières facilement recyclables. Les pales en matériaux composites (résine et fibres de verre et/ou carbone) sont plus difficilement recyclables (50% de récupération de matière environ pour les premières opérations réalisées).
- De plus en plus de projets en France et dans le monde sont lancés pour améliorer soit les techniques de recyclage des pales existantes, soit la recyclabilité des pales à venir (exemple : projet Zebra d'éco-conception de pales 0 déchet et 100% recyclables).

Focus sur le repowering : le remplacement des éoliennes d'origine par des éoliennes plus puissantes et de taille plus importante offre des opportunités mais comprend aussi des limites et des contraintes

Des opportunités :

- Amélioration de la performance énergétique et allongement de la durée de vie de l'exploitation
- Adaptation du projet pour prise en compte accrue des enjeux environnementaux grâce à la connaissance acquise au cours des premières années d'exploitation

Des contraintes :

- Réglementaires : respecter le cadre réglementaire qui a pu évoluer (distances aux habitations...)
- Environnementales : augmentation du risque pour l'avifaune... et de nuisances pour les riverains (émergence de nouvelles habitations autour du site...)

Des projets de démantèlement et de recyclage de parcs éoliens en France

1- Les retours d'expériences de projets concrets

a- Le projet de démantèlement du parc éolien Port-La-Nouvelle

En novembre 2019, **ENGIE Green** a piloté le projet de **démantèlement et de recyclage du parc éolien le plus ancien de France à Port-La-Nouvelle** dans l'Aude (construit en 1993, composé historiquement de 3 éoliennes). Ce démantèlement a été l'occasion de mieux comprendre la réglementation en vigueur et d'éprouver les coopérations industrielles nécessaires pour organiser les opérations et remettre en état le site.

Ce projet a mobilisé **plusieurs acteurs partenaires** : **Engie Green** (gestion de projet), **Coverwind** (coordinateur et superviseur du projet ; **Martin Levage** (le Levage, manutention, transport, stockage,) **Lavoie** (terrassament et découpe des composants) ; **Suez** (tri, traitement et valorisation des déchets sur site) ; **Reciclalia** (recyclage des pales/valorisation par pyrolyse de la pale : récupération des fibres de verre et de carbone, notamment pour fabriquer des piscines...).

Travaux sur site d'Engie Green avec Martin Levage

Levage et démontage du rotor et de la nacelle



Illustration of some dismantling activities

Illustration du chantier de Port-La-Nouvelle

Tous les éléments : nacelles, câblages, pales... ont été démontés et acheminés vers des filières de recyclage et de valorisation.

Plus de **96 %** des composants recyclés.



b- Le projet ZEBRA - Zero Waste Blade Research Project Fabrication de la première pale en matériaux composites

Le projet ZEBRA : chiffres clés

- **Budget: €18.5 million**
- **Durée: 42 mois**
- **Consortium 7 membres:**

5 industriels : Arkema, Engie, LM Wind Power, Owens Corning, Suez

1 centre technique :

Plateforme Canoe

1 Institut de Recherche :

Institut Jules Verne pour la Recherche Technologique (IRT)

Le projet ZEBRA, initié par ENGIE et Arkema, est désormais piloté par l'IRT Jules Verne. Il a pour objectif de fabriquer des pales éoliennes éco-conçues (à partir de la résine thermoplastique Elium®) 0 déchet, 100% recyclables et efficaces énergétiquement.

Lancé en septembre 2020, le projet a pour objectif de fabriquer deux prototypes de pales éco conçues d'ici 2024.

L'innovation du projet réside dans l'utilisation de matériaux innovants entièrement recyclables: une résine thermoplastique Elium® conçue par Arkéma et des matériaux composites (fibre de verre et fibre de carbone) pour le renforcement des pales, fournis par Owens Corning.

Strategic consortium to develop viable value chains

Schéma

Schéma du processus de fabrication des pales éco-conçues par l'ensemble les partenaires du projet

Source ENGIE



ENGIE

© ENGIE 2022

CANOE, avec son procédé de recyclage de matériaux composites, est en charge du recyclage. LM Wind Power fabrique les deux pales d'essai et effectue les tests. Suez est en charge du démontage et de la préparation au recyclage des pales, Engie apporte son expérience d'exploitant de parcs éoliens et réalise une analyse du cycle de vie et une analyse du cycle de coût de ces pales.

La suite...

Les partenaires du projet continuent de travailler sur le développement et l'optimisation du processus de fabrication.

Les 1ers tests grandeur nature de la durée de vie du prototype ont débuté (par LM Wind Power au Danemark). S'en suivront la validation des méthodes et des procédés de recyclage.

Des travaux sont en cours pour la fabrication de la 2^{ème} pale.

Chaque partenaire a donc un rôle bien défini dans le processus de fabrication.



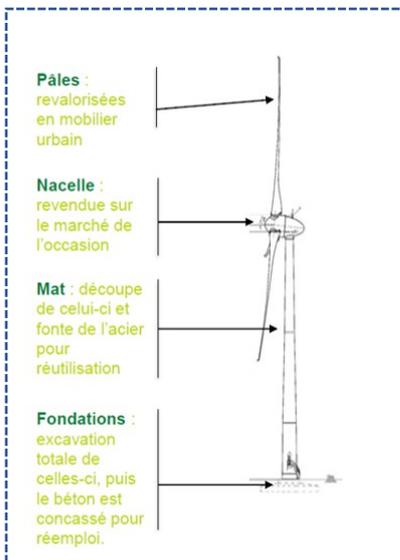
Le prototype de la plus grande pale 100 % recyclable éco conçue du monde (62m) fabriqué à l'usine espagnole de LM Wind Power de Ponferrada le 14/02/2022

c- Le projet de Rivesaltes - un autre projet de repowering exemplaire

GEG ENeR, filiale de l'énergéticien grenoblois GEG, dispose de 26 centrales photovoltaïques, 11 centrales hydroélectriques et 4 parcs éoliens pour la production d'énergie renouvelable répartis sur tout le territoire français.



Parc éolien de Rivesaltes avant Repowering



GeG ENeR a procédé à un **repowering complet du parc éolien vieillissant de Rivesaltes** (dans les Pyrénées Orientales) : démantèlement, recyclage et reconstruction.

Le projet prévoyait le remplacement de 8 éoliennes actuelles d'une puissance de 7,6 MW par 6 éoliennes nouvelle génération d'une puissance de 11,2 MW.

Le démantèlement s'est déroulé sur 4 mois (d'avril 2021 à juillet 2021). Les pales ont ensuite été revalorisées en mobilier urbain, les nacelles revendues sur le marché d'occasion, le mat découpé et l'acier qui le compose fondu pour être réutilisé, les fondations ont été entièrement excavées avec concassage du béton pour réemploi.

Le projet de repowering est un succès et affiche un taux global de recyclage et/ou de réemploi de 99% pales incluses.



Source GEG ENeR

L'installation des nouvelles éoliennes est en cours. Les nouvelles fondations ont été installées en 6 semaines (de janvier à février 2022).

2- Le projet de recherche FUI 25 FEDRE – Fondation d’Eoliennes Durable avec REpowering

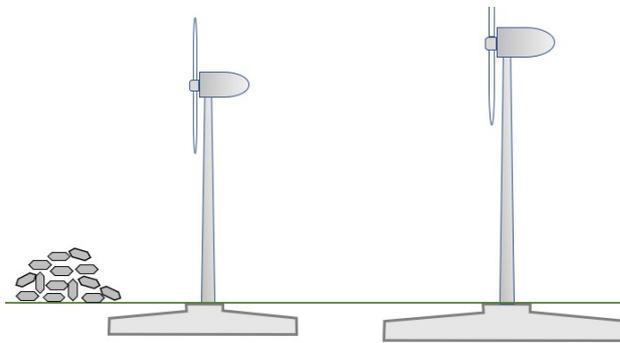
Le projet FEDRE : chiffres clés

- **Budget: 860 k€**
- **Durée: 5 ans**
- **Consortium :**
AnteaGroup, l’INSA Lyon, Ménard, CTE Wind (BE), Nordex, Parex-Lanko.
- **Le projet a été labellisé par le pôle Tenerrdis**

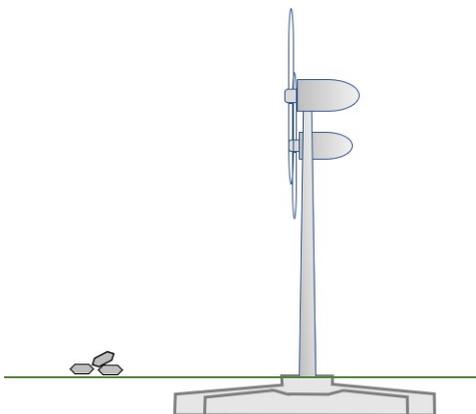
Le projet FEDRE, (25^{ème} appel à projets FUI-Régions), a pour objectif d’améliorer la compétitivité des éoliennes en optimisant la construction de leurs fondations (lourdes semelles en béton fortement armé sous terre). Les premiers parcs éoliens français commencent à arriver en phase de repowering. Le remplacement des aérogénérateurs et des mâts implique le remplacement de la fondation d’éolienne.

Pratique actuelle :

- Déconstruction de l’ancienne semelle ;
- Reconstruction d’une nouvelle semelle plus large et plus massive (à côté ou au même emplacement) => Ce qui n’est pas optimum d’un point de vue environnemental.



Déconstruction d’une semelle, et pratique actuelle - Source AnteaGroup



Le projet FEDRE vise à améliorer cette pratique via deux approches :

- **Sur le court terme :** Trouver des solutions techniques permettant de réutiliser et d’optimiser les semelles existantes, en faisant « travailler » l’ancienne semelle avec la nouvelle, ce qui réduira le volume de béton et d’acier nécessaire. Il s’agira d’adapter une nouvelle semelle sur une semelle existante.

⇒ Déconstruction de la partie visible de l’éolienne, démolition d’une partie de la semelle et reconstruction d’une nouvelle par-dessus, montage de la nouvelle éolienne.

- **Sur le long terme :** Concevoir une nouvelle semelle de fondation « rééquipable » qui pourra s’adapter à plusieurs générations successives d’aérogénérateurs et de mâts.

Déroulé du projet de démonstrateur :

Au départ, une fondation a été construite pour accueillir une tour d'éolienne de 3,6 MW et d'une hauteur de 91 m (de septembre à octobre 2019). Elle a été largement instrumentée au cours de cette période et servira de base à la validation numérique et expérimentale.

Au total, il s'agit de l'**instrumentation de 3 semelles de fondations neuves**, dans 3 parcs éoliens distincts. Ces instrumentations (avec des fibres optiques et des capteurs de contraintes, de tassement...) permettent de suivre le transfert de charge du bas du mât jusque dans le sol et d'étudier le comportement du béton grâce à des centrales d'acquisitions.

Pour + d'infos techniques sur le projet FEDRE :

<https://www.tenerdis.fr/fr/projets/fedre/>

- Réalisation d'une **maquette à l'échelle 1/10 de la fondation du démonstrateur** au laboratoire GEOMAS à l'INSA Lyon sur la base de modélisation numérique afin de rechercher les meilleures règles de similitudes avec la semelle grandeur nature. Le but de ces maquettes étant de les éprouver via un programme de tests permettant d'évaluer les sollicitations dans la semelle et de valider leur comportement. Ces maquettes sont également destinées à tester les **futures solutions de repowering** : c'est-à-dire prédire le comportement des fondations ayant subi des actions ou modifications pour le repowering. L'objectif étant à terme d'obtenir des solutions de repowering pour des fondations réelles.
- **Fin du projet prévu pour septembre 2023** : l'enjeu majeur sera de passer aux tests en conditions réelles.



Réalisation d'une 1ère maquette à l'échelle 1/10 sur la base de modélisations numériques afin de rechercher les meilleures règles de similitude avec la semelle grandeur nature.



**PRÉFÈTE
DE LA RÉGION
AUVERGNE-
RHÔNE-ALPES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement
Auvergne-Rhône-Alpes

crédits photo : ENGIE- ANTEA - GEG

