

Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien

Mai 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *I CARE ENVIRONNEMENT*

Coordination technique : *Robert Bellini* – **Service :** *Réseaux et Energies Renouvelables*



Rapport final

TABLE DES MATIERES

1. OBJECTIFS, DEROULE ET PERIMETRE DE L'ETUDE	7
1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	7
1.2. DEROULE DE L'ETUDE	7
1.3. PERIMETRE DE L'ETUDE	8
2. ANALYSE DES FLUX ET ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE POUR LE SECTEUR EOLIEN	8
2.1. ANALYSE DE FLUX	8
2.2. LEVIERS DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE	17
2.3. IDENTIFICATION DES ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE POUR LE SECTEUR EOLIEN	17
3. IDENTIFICATION ET SELECTION DES OPPORTUNITES	24
3.1. IDENTIFICATION ET ANALYSE DES OPPORTUNITES	24
3.2. SELECTION DES OPPORTUNITES A APPROFONDIR	33
4. EVALUATION QUALITATIVE DES OPPORTUNITES RETENUES	34
4.1. STRUCTURER UNE FILIERE POUR LE RECYCLAGE DES PALES	34
4.2. FAVORISER L'EXTENSION DE LA DUREE DE VIE DES PARCS EOLIENS	37
4.3. FAVORISER LA MONTEE EN COMPETENCE DES PRESTATAIRES LOCAUX POUR LES SERVICES DE RECONDITIONNEMENT ET DE MAINTENANCE	42
4.4. PERENNISER LES PLATEFORMES DE FABRICATION DES EOLIENNES MARITIMES AVEC LE DEMANTELEMENT DES PARCS TERRESTRES	45
4.5. AUGMENTER LA CAPACITE DE FABRICATION DES TOURS EN FRANCE POUR FAVORISER LES ACHATS LOCAUX	49
4.6. FAIRE EMERGER UN GRAND ENSEMBLIER FRANÇAIS POUR OPTIMISER LA CHAINE DE VALEUR ET LES FLUX	52
5. CONCLUSION SUR L'OPPORTUNITE DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE POUR L'EOLIEN	55
6. ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE	57
7. ANNEXE 2: HYPOTHESES POUR L'EVALUATION QUALITATIVE DES OPPORTUNITES	58

TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 1 : DETAIL DE LA DEMARCHE PROJET	7
FIGURE 2 : TYPOLOGIE DE FLUX CONSIDERES DANS L'ETUDE	8
FIGURE 3 : RESULTATS ANALYSE FLUX MATIERE POUR L'HORIZON LONG TERME	14
FIGURE 4 : FLUX LOGISTIQUE POUR L'EOLIEN TERRESTRE	15
FIGURE 5 : FLUX LOGISTIQUE POUR L'EOLIEN EN MER	15
FIGURE 6 : RESULTAT DE L'ANALYSE DES FLUX DE SERVICE	16
FIGURE 7 : IDENTIFICATION DES ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE POUR L'EOLIEN SUR LES 3 HORIZONS CONSIDERES DANS L'ETUDE	17
FIGURE 8 : LOCALISATION DES ECOSYSTEMES LOCAUX POUR L'EOLIEN EN MER	18
FIGURE 9 : LEVIERS POUR L'ALLONGEMENT DE LA DUREE D'USAGE DES EQUIPEMENTS INSTALLES.....	21
FIGURE 10 : DETAIL DES FLUX MATIERE SORTANT DU PARC TERRESTRE FRANÇAIS	22
FIGURE 11 : ETAT DES LIEUX DES FILIERES DE RECYCLAGE POUR LES PRINCIPAUX MATERIAUX DE L'EOLIENNE.....	22
FIGURE 12 : SELECTION DES ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE POUR ETUDE APPROFONDIE	23
FIGURE 13 : ENJEUX ET OPPORTUNITES DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE POUR LE SECTEUR EOLIEN	24
FIGURE 14 : MATRICE ATTRACTIVITE / FAISABILITE DES 17 OPPORTUNITES	33
FIGURE 15 : FLUX MATIERE COMPOSITE DES PALES SORTANT DU PARC (EN KT)	34
FIGURE 16 : POSSIBILITE DE TRAITEMENT DES PALES EN FIN DE VIE ET COUT ASSOCIES	35
FIGURE 17 : EVALUATION DES BENEFICES ECONOMIQUES, SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX LIES A L'ETABLISSEMENT D'UNE FILIERE DE RECYCLAGE DE PALES, SOUS L'HYPOTHESE D'UN FLUX SORTANT DE COMPOSITE DE 15 KT/AN.	36
FIGURE 18 : EVALUATION DES RECETTES ET DEPENSES D'UNE INSTALLATION EOLIENNE AU COURS DE SA DUREE D'EXPLOITATION. .	38
FIGURE 19 : EVOLUTION DES CAPACITES A HORIZON 2030, SUIVANT DEUX SCENARIOS DE DUREE DE VIE DES PARCS. JUSQU'EN 2015 : INSTALLATIONS ANNUELLES OBSERVEES. 2015-2030 : HYPOTHESE DE 1 000 MW D'INSTALLATIONS PAR AN.	40
FIGURE 20 : EVALUATION DES BENEFICES ECONOMIQUES, SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX LIES A L'ALLONGEMENT DE LA DUREE DE VIE DE 5 ANS. BENEFICES ECONOMIQUES ET BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX CALCULES POUR UNE TRANCHE DE CAPACITE EOLIENNE DE 1000 MW ; BENEFICES SOCIAUX A HORIZON 2030, EN SUPPOSANT UN RYTHME D'INSTALLATION DE 1 000 MW/AN APRES 2015.	40
FIGURE 21 : EVOLUTION DES ETP DEDIES A LA MAINTENANCE DES PARCS EOLIENS TERRESTRES EN FRANCE (AVANT 2015 : INSTALLATIONS OBSERVEES ; APRES 2015, HYPOTHESE D'INSTALLATION DE 1 000 MW/AN). EN BLEU : DUREE DE VIE DES PARCS DE 20 ANS ; EN ORANGE : DUREE DE VIE DES PARCS DE 25 ANS ; EN POINTILLE : CONTRIBUTION DU SEUL ALLONGEMENT DE LA DUREE DE VIE.	41
FIGURE 22 : EVALUATION DES BENEFICES ECONOMIQUES ET SOCIAUX LIES A LA MONTEE EN COMPETENCE DES PRESTATAIRES LOCAUX POUR LES SERVICES DE RECONDITIONNEMENT ET DE MAINTENANCE, POUR UNE CAPACITE EOLIENNE DE 10 000 MW.	44
FIGURE 23 : DISPOSITIF INDUSTRIEL MIS EN PLACE POUR LES 2 APPELS D'OFFRES POUR L'EOLIEN EN MER.....	46
FIGURE 24 : SCHEMATISATION DES FLUX DE MATIERE DE L'EOLIEN.....	47
FIGURE 25 : EVALUATION DES BENEFICES ECONOMIQUES, SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX LIES A L'ACCROISSEMENT DE LA CAPACITE DE FABRICATIONS DE TOURS FRANÇAISES, POUR UN MARCHÉ ANNUEL DE 1 000 MW DE NOUVELLES INSTALLATIONS.	50
FIGURE 26 : EVALUATION DES BENEFICES ECONOMIQUES, SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX LIES A L'EMERGENCE D'UN GRAND ENSEMBLER FRANÇAIS CAPTANT UN MARCHÉ ANNUEL DE 300 MW DE NOUVELLES INSTALLATIONS.	53
TABLEAU 1 : TECHNOLOGIES PRISES EN COMPTE DANS L'ETUDE	10
TABLEAU 2 : SOURCES DES DONNEES POUR L'ANALYSE DE FLUX MATIERE PAR VARIANTES TECHNOLOGIQUES CONSIDEREES	11
TABLEAU 3 : RESULTATS ANALYSE FLUX MATIERE GROS VOLUMES POUR LES 6 VARIANTES	11
TABLEAU 4 : RESULTATS ANALYSE FLUX MATERIAUX RARES POUR LES 6 VARIANTES	12
TABLEAU 5 : RESULTAT ANALYSE FLUX MATIERE POUR L'HORIZON COURT TERME	13
TABLEAU 6 : HYPOTHESES DE REPARTITION DE LA MAINTENANCE, DANS LE SCENARIO DE REFERENCE ET DANS LE SCENARIO AVEC OPPORTUNITE	44

REMERCIEMENTS

- **ADEME, Service Réseaux et Energies Renouvelables**
- **Alain Geldron (ADEME, Direction Economie circulaire et déchets)**
- **Lucas Robin Chevallier (France Energie Eolienne)**
- **David Saint-André (Syndicat des Energies Renouvelables)**

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

RESUME EXECUTIF

L'objectif de la présente étude est d'identifier **dans quelle mesure l'économie circulaire représente une opportunité pour le secteur éolien**, et ce à travers la réalisation d'un premier panorama des enjeux de l'économie circulaire pour la filière éolienne : ce panorama volontairement large constituera un outil d'aide à la décision pour l'ADEME et les acteurs de la filière.

Pour ce faire, après avoir réalisé une **analyse des flux** (flux matière, flux logistique et flux de service) liés au secteur éolien qui a permis de mettre en évidence les **enjeux spécifiques de l'économie circulaire** pour le secteur, l'étude a identifié ensuite les **opportunités stratégiques** qui permettent de répondre à ces enjeux. Une sélection de **six opportunités** a été étudiée plus en détail afin d'évaluer les bénéfices associés et analyser les freins à leur mise en œuvre. Ces 6 opportunités sont les suivantes :

- Structurer une filière pour le recyclage des pales
- Favoriser le modèle d'affaire de l'extension de la durée de vie des éoliennes
- Favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de reconditionnement et de maintenance
- Pérenniser les plateformes de fabrication de l'éolien en mer par l'activité de démantèlement
- Augmenter la capacité de production de tours en France pour favoriser les achats locaux
- Faire émerger un ensemble français sur l'éolien terrestre pour optimiser la chaîne de valeur des flux

Au vu de l'ensemble des opportunités identifiées et des 6 opportunités analysés plus précisément, on peut conclure **au potentiel stratégique important que représente l'économie circulaire pour le secteur éolien français**. Ces opportunités forment un ensemble cohérent d'initiatives qui permettent d'améliorer la performance environnementale, économique et sociale de la filière éolienne en renforçant les activités industrielles et de services sur l'ensemble du cycle de vie : phase fabrication (optimisation des flux logistiques et fabrication locale), phase utilisation (maintenance, reconditionnement) et phase fin de vie des éoliennes (démantèlement, recyclage).

Alors que la filière a été jusque-là focalisée sur la résolution de challenges technologiques, sur l'industrialisation et sur la constitution d'un parc de première génération, **l'économie circulaire représente une opportunité pour les 15 années à venir**, que ce soit pour gagner en efficacité d'utilisation des ressources pour les flux entrants, ou pour traiter de manière efficace les flux sortants lors du démantèlement du parc actuellement installé.

Sur la dimension « produit », les principaux enjeux consistent à maîtriser la consommation des terres rares et à créer une filière de traitement spécifique pour les pales composites, mais aussi à maximiser l'utilisation des équipements, que ce soit par l'extension de la durée de vie de l'éolienne ou par le reconditionnement et la réutilisation de composants clés. La constitution d'une activité experte de maintenance / recyclage étant une composante majeure de l'économie circulaire créatrice de valeur et d'emplois peu délocalisables.

Sur la dimension « territoriale », la France ne disposant pas de constructeur majeur, il y a un grand potentiel d'optimisation des flux logistiques et de service, par le rapatriement de valeur ajoutée à différents niveaux (constructeur, fabrication de tours, maintenance de 2^{ème} niveau), ce qui permettrait de limiter les transports et de monter en compétence sur l'ensemble de la chaîne de valeur, ceci pouvant se cristalliser par la constitution d'un ou plusieurs écosystèmes industriels pérennes.

Pour contribuer au développement de ces opportunités, l'ADEME peut actionner plusieurs leviers :

- Réaliser des études environnementales approfondies, afin de préciser ou de valider certaines opportunités du point de vue environnemental
- Réaliser des études stratégiques et économiques pour valider la portée de certaines opportunités
- Soutenir l'innovation pour les écotecnologies dans l'éolien
- Contribuer à faire intégrer des critères liés à l'économie circulaire dans les décisions publiques
- Promouvoir le développement des opportunités

Pour conclure, alors que la filière française éolienne est encore jeune et sans tête de file, la prise en compte de l'économie circulaire est une opportunité stratégique pour gagner en compétitivité et remonter la chaîne de valeur.

ABSTRACT

The objective of this study is to identify how the circular economy can be an opportunity for the French wind industry. A broad review of circular economy issues for the wind industry value chain has been conducted in order to be used as a decision making tool for ADEME and the wind industry stakeholders.

First of all, a “flow analysis” (including material, logistic and services related to wind power) has been carried out in order to highlight the specific challenges of circular economy for the wind sector. The strategic opportunities that meet these issues have then been identified. A selection of six opportunities has been further investigated to assess the benefits, to analyze the barriers and to identify actions that ADEME could initiate to foster these opportunities. These investigated opportunities are the following:

- To structure a recycling chain for wind blades
- To promote the business model of the extension of wind turbine's lifetime
- To promote skills improvement of local providers for reconditioning and maintenance services
- To adapt the offshore hubs to integrate dismantling activity of onshore equipments
- To increase the manufacturing capacity of wind towers in France to increase local sourcing
- To encourage the creation of a leading French manufacturer to optimize the supply chain

In the light of this analysis, it can be concluded that circular economy represents a strategic opportunity for the French wind energy sector. The opportunities we focused on make up a consistent set of initiatives that improve the environmental, economic and social performance of the wind energy sector by strengthening industrial activities and services throughout all the life cycle: manufacturing stage (optimization of logistics flows and local manufacturing), use phase (maintenance, repair) and end-of-life phase of wind turbine (dismantling, recycling).

While the sector has so far been focused on better solving technological challenges and industrializing the first-generation turbines, circular economy appears as an opportunity for the next 15 years.

Concerning the "product dimension": the main challenges are to control rare earth consumption and to create a specific treatment process for composite blades, but also to maximize the use of equipment by extending the equipment lifetime or the reconditioning of critical components. The creation of maintenance / recycling activities is a major component of circular economy, which creates value and local jobs.

Concerning the "territorial dimension": as there is no French leading manufacturer, there is still a large potential to optimize supply chain, by relocalizing added value at different levels (windturbine assembly, tower manufacturing, 2nd level maintenance). This would limit transportation and enhance skills throughout the all value chain creating more sustainable industrials ecosystems.

To contribute to the development of these opportunities, ADEME can pull several levers:

- To conduct in-depth environmental studies to validate environmental opportunities
- To conduct strategic and economic studies to validate the impact of strategic opportunities
- To support innovation for eco-technologies in wind turbine sector
- To promote the integration of circular economy criteria in public policies
- To promote development of the opportunities

To conclude, as the French wind industry is still young and lacking of clear leader, pulling the levers of circular economy is a strategic opportunity to strengthen the French wind industry.

1. Objectifs, déroulé et périmètre de l'étude

1.1. Objectifs de l'étude

En tant qu'énergie « locale » renouvelable, l'éolien s'inscrit quasi-naturellement dans l'économie circulaire au sens de son acception la plus large. Au-delà de la réduction de la pression sur les ressources et des impacts environnementaux, il s'agit d'intégrer l'énergie éolienne dans la vie du territoire (emplois et valeur ajoutée) tout au long du cycle de vie (production, installation, maintenance, fin de vie) est un enjeu fort d'acceptabilité et de valeur ajoutée de cette filière.

Dans ce contexte, l'objectif de la présente étude est d'identifier **dans quelle mesure l'économie circulaire représente une opportunité pour le secteur éolien**. Ce premier panorama des enjeux de l'économie circulaire pour la filière éolienne, avec des éléments chiffrés et factuels, tant sur le plan technique, environnemental que socio-économique, pourra constituer un outil d'aide à la décision pour l'ADEME et les acteurs de la filière.

1.2. Déroulé de l'étude

Cette étude s'est déroulée sur 5 mois, de décembre 2014 à avril 2015.

Après avoir réalisé une **analyse des flux** liés au secteur éolien qui a permis de mettre en évidence les **enjeux spécifiques de l'économie circulaire** pour le secteur éolien, l'étude a ensuite identifié les **opportunités stratégiques** qui permettent de répondre à ces enjeux. Une sélection de **six opportunités** a été étudiée plus en détail afin d'évaluer les bénéfices associés, d'analyser les freins à leur mise en œuvre et d'identifier les actions à entreprendre pour préciser ces opportunités.

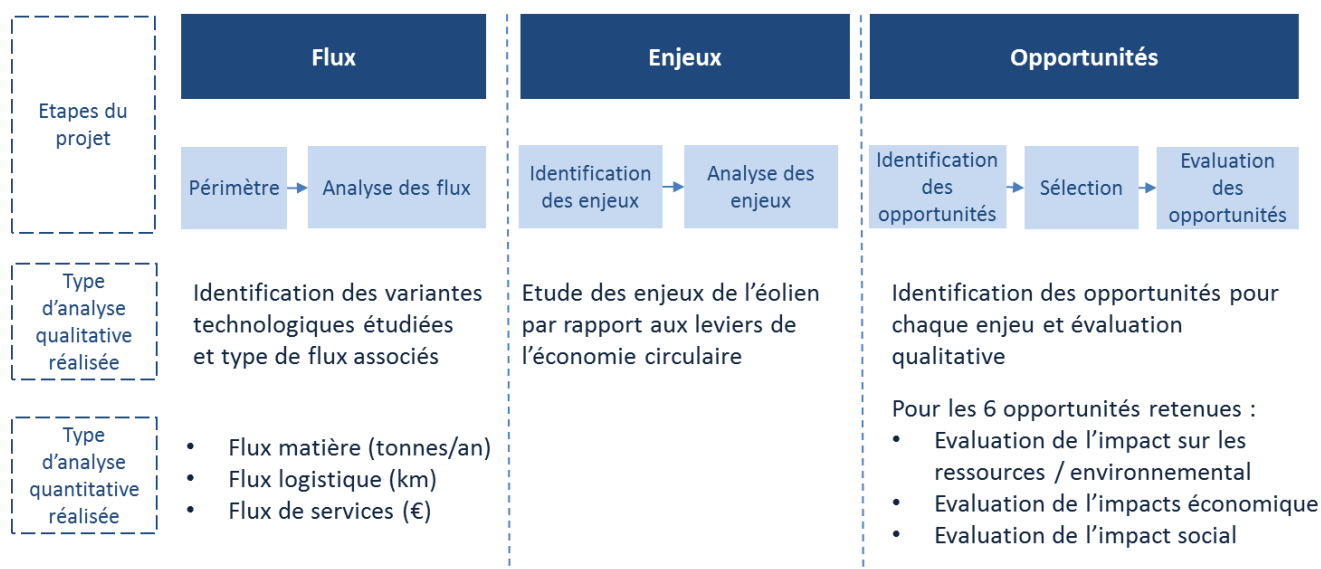


Figure 1 : Détail de la démarche projet

1.3. Périmètre de l'étude

Le périmètre pris en compte dans cette étude est le suivant :

- **Technologies de l'éolien**: Les filières terrestres et maritimes sont analysées et l'ensemble des technologies représentatives des parcs installés en France sont prises en compte. Le petit éolien ne fait pas partie du périmètre de l'étude.
- **Matériaux et composants**: L'ensemble des matériaux et composants mobilisés sur une éolienne sont pris en compte, avec une attention particulière sur les matériaux rares mais aussi en fonction de leur importance relative, c'est-à-dire avec une pondération par les volumes.
- **Etapas du cycle de vie** : Toutes les étapes sont prises en compte.
- **Périmètre temporel** : L'étude prend en compte l'existant (parc installé à fin 2014) mais aussi les évolutions à venir dans les technologies éoliennes.

2. Analyse des flux et enjeux de l'économie circulaire pour le secteur éolien

2.1. Analyse de flux

2.1.1. Méthodologie générale

Pour caractériser les enjeux et le potentiel de l'économie circulaire, il faut se fonder sur une analyse chiffrée de l'utilisation des ressources, analyse qui est fournie par une **analyse des flux**. Ce terme de « flux » désigne en fait 3 typologies qui entrent ou qui sortent du système considéré (ici l'éolienne).

- Les **flux de matière** : on considère ici les flux de matières (chiffrés en tonne) tout au long du cycle de vie : flux entrants pour la construction (matériaux constitutifs), flux entrants ou sortants pour l'exploitation (consommables, maintenance), et flux sortants pour la fin de vie (démantèlement). Ces chiffres sont fournis par les études du type Analyses de Cycle de Vie (ACV).
- Les **flux logistiques** : on considère ici le transport engendré par l'éolienne tout au long de son cycle de vie (approvisionnement matière, transports de pièces, livraison de segments...): ces flux logistiques ont un impact notamment en termes d'utilisation de ressources énergétiques ; ils peuvent être chiffrés en t.km et convertis en émissions de gaz à effet de serre correspondantes. L'information sur ces flux logistiques provient de l'analyse des schémas d'approvisionnement des acteurs de la chaîne de valeur de l'éolien.
- Les **flux de service** : ni vraiment matière ni transport, on considère ici les services qui sont fournis au système éolien pendant l'ensemble du cycle de vie. Ces services, valorisés en euros et dont les valeurs proviennent de l'analyse de coût de l'éolien, couvrent de fait un mix de coûts de matière et de coûts salariaux.

Types de flux	Types de données exploitées	Type de résultats
• Flux matière	• Analyse du Cycle de Vie	• Type et quantité des flux matière tout au long du cycle de vie
• Flux logistique	• Analyse des schémas d'approvisionnement	• Décomposition par composants et sous-composant de la logistique d'approvisionnement
• Flux de service	• Analyse de coût de l'éolien	• Répartition des coûts service des phases exploitation et maintenance

Figure 2 : Typologie de flux considérés dans l'étude

Ces flux ont été analysés sur un périmètre technologique qui correspond au parc installé à fin 2014 et prévisionnel à court terme : les filières terrestres (à l'exception du petit éolien) et maritimes ont été prises en

compte et analysées séparément, et l'ensemble des technologies utilisées actuellement ont été analysées. Le périmètre géographique est le territoire métropolitain (les machines adaptées aux conditions tropicales n'ont pas été spécifiquement détaillées).

Enfin, dans le cas d'un secteur d'équipement industriel comme le secteur éolien, avec des durées de vie « longues », il est pertinent de distinguer 3 horizons de temps qui correspondent à des flux très différents :

- Un **horizon court-terme (2015-2020)** : on raisonne ici à technologie constante (les modèles d'éoliennes à installer sur cette période sont connus), et on se préoccupe principalement des **flux entrants** dans le parc.
- Un **horizon moyen-terme (2020-2025)** : le parc éolien est toujours en voie de constitution (le démantèlement n'a pas commencé) : les **flux entrants** sont constitués par la prochaine génération d'éoliennes.
- Un **horizon long-terme (2025-2030)** : cet horizon correspond approximativement à la période de démantèlement du parc installé (en faisant l'hypothèse d'une durée de vie de 20 ans) ; l'analyse porte alors sur les **flux sortants**.

2.1.2. Résultats de l'analyse des flux de matière

a) Données exploitées

Pour identifier les variantes technologiques à prendre en compte dans l'étude conformément au périmètre choisi (cf 1.3), une analyse de l'existant a été effectuée pour identifier les technologies représentatives du parc éolien français (terrestre et en mer).

Cette analyse s'est fondée sur les puissances installées et prévisionnelles entre 2005 et 2016, en considérant les données de suivi du parc terrestre¹ et les prévisions d'installations pour l'éolien en mer. Le détail des technologies prises en compte est présenté dans le Tableau 1. Le périmètre considéré permet de différencier 6 variantes technologiques à prendre en compte :

- **4 variantes** pour le terrestre qui se distinguent par l'architecture de la chaîne électromécanique :
 - Présence d'un multiplicateur versus entraînement direct, génératrice à rotor bobiné versus à aimants permanents
 - Type de matériaux pour le mât : acier vs béton
- **2 variantes pour l'éolien en mer**, qui se distinguent par les types de fondations utilisées
Les types de fondations pour l'éolien en mer ont été restreintes au monopieu et à la fondation gravitaire.

Pour l'éolien terrestre, les technologies considérées dans cette étude représentent plus de 80% des machines installées.

¹ Source : base de données ADEME.

				Variantes technologiques			
Eolien terrestre	Constructeurs	Modèles	Puissance cumulée (en MW)	Multiplicateurs	Aimant permanent	Matériaux tour	Matériaux pales
	Vestas	V90	1560	Avec (génératrice asynchrone)	Non	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
	Enercon	E70	1502	Sans (génératrice synchrone)	Non	Acier ou béton	Plastique – fibre verre / carbone
	Enercon	E82	1495	Sans (génératrice synchrone)	Non	Acier ou béton	Plastique – fibre verre / carbone
	Senvion	MM92	1300	Avec (génératrice asynchrone)	Non	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
	Senvion	MM82	591	Avec (génératrice asynchrone)	Non	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
	Gamesa	G90	498	Avec (génératrice asynchrone)	Non	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
	Nordex	N100	447	Avec (génératrice asynchrone)	Non	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
	Nordex	N90	164	Avec (génératrice asynchrone)	Non	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
	Vestas	V112	126	Avec (génératrice synchrone)	Oui	Acier	Plastique – fibre verre / carbone
<i>Total</i>			7683				

Eolien en mer	Constructeur	Modèles	Puissance cumulée (en MW)	Multiplicateurs	Aimant permanent	Matériaux tour	Matériaux pales	Fondations
	Alstom	Haliade 150	1428	Sans (génératrice synchrone)	Oui	Acier	Plastique – fibre verre / carbone	Monopieu acier / gravitaire
Adwen	Adwen 8MW	1492	Avec (génératrice synchrone)	Oui	Acier	Plastique – fibre carbone	Non confirmé à ce stade	

Tableau 1 : Technologies prises en compte dans l'étude

Sur cette base, une revue de littérature² a permis d'identifier les analyses de cycle de vie disponibles pour certaines variantes et les données manquantes pour d'autres. Pour les variantes pour lesquelles les données n'étaient pas disponibles, des extrapolations ont été opérées. Les extrapolations considérées sont résumées dans le Tableau 2.

² Le détail des publications étudiées est présenté en annexe.

6 variantes technologiques étudiées	ACV existantes	Extrapolations réalisées
- Synchrones - Sans aimant permanent - Mât acier		Moyenne (Combinaison de la moyenne mât acier et données technologie synchrone)
- Asynchrone - Mât acier	 (Vestas, Gamesa)	Moyenne (Publications technologie asynchrone)
- Asynchrone - Mât béton		Moyenne (Publication pour mât béton et moyenne publications technologie asynchrone autres constituants)
- Synchrones - Avec aimant permanent - Mât acier	 (Vestas)	
- Synchrones - Avec aimant permanent - Mât acier - Fondation monopile	 (Alstom)	Hypothèses (Flux identiques pour les 2 constructeurs)
- Synchrones - Avec aimant permanent - Mât acier - Fondation gravitaire	 (Alstom)	Hypothèses (Flux identiques pour les 2 constructeurs)

Tableau 2 : Sources des données pour l'analyse de flux matière par variantes technologiques considérées

b) Résultats de l'analyse des flux de matière

Par masses principales

Les résultats bruts pour les gros volumes par matériau pour les 6 variantes sont présentés dans le Tableau 3.

Technologies		Terrestre							Offshore		Moyenne pondérée des technologies
		Synchrones - Sans aimant - Mât acier	Asynchrone - Mât acier			Asynchrone - Mât béton	Synchrones - Avec aimant - Mât acier	Moyenne pondérée des technologies	Synchrones - Avec aimant - Gravitaire	Synchrones - Avec aimant - Monopile	
			Type Enercon	Type Vestas	Type Gamesa						
Hypothèses de répartition des technologies		30%	16%	5%	36%	10%	3%		35%	65%	
Aérogénérateur	Acier t/MW	124,4	86,3	95,5	90,9	56,4	81,6	97	113		113
	Fonte t/MW	31,8	12,6	19,2	19,1	17,1	21,9	22	11,9		12
	Cuivre t/MW	5,1	1,4	1,5	2,2	1,5	1,6	3	1,7		2
	Aluminium t/MW	0,6	3,6	NR	2,6	1,7	1,1	2	NR		NR
	Composite t/MW	12,6	8,7	9,0	9,6	10,7	15,0	11	16,3		16
	Béton t/MW	-	-	-	-	343,9	-	34	-		-
	Aimant permanent t/MW	-	-	-	-	-	0,16	0,004	0,20		0,20
Total aérogénérateur t/MW	175	113	125	124	464	121	169	143		143	
Fondations	Acier t/MW	23	20	19	20	19	15	21	122	225	189
	Béton / Ciment t/MW	474	453	369	414	389	301	434	1080	10	378
	Sable t/MW	-	-	-	-	-	-	-	1 627	-	567
Total fondations	497	473	388	434	408	316	455	2 829	235	1 134	
Poste en mer	Acier t/MW	NA							5,9		6
	Cuivre t/MW	NA							0,5		0,5
	Ciment t/MW	NA							0,05		0,05
Raccordement	Cuivre t/MW	NA							7,2		7

Tableau 3 : Résultats analyse flux matière gros volumes pour les 6 variantes

Pour l'éolien terrestre les premiers constats sont les suivants :

- Les technologies synchrones ont une plus grande consommation de métaux.
 - Plus d'acier et de fonte par rapport aux modèles asynchrones, dû à l'absence de multiplicateur
 - 3 fois plus de cuivre pour les technologies à bobinages (sans aimant permanent)
- Plus de consommation de matière pour les modèles mât en béton
 - Eoliennes 3,5 fois plus lourds que celles avec mât en acier

Pour l'éolien en mer, les constats portent principalement sur les fondations, les technologies des éoliennes étant sensiblement les mêmes :

- Très grand volume de matière pour fondation gravitaire
 - Consommation de matière 12 fois plus importantes que pour les fondations en monopile, mais 2 fois moins d'acier que les fondations en monopile
- La quantité de matière utilisée dans les fondations est très dépendante de la technologie choisie (gravitaire, monopile, jacket)

Par matériaux a priori critiques

Les résultats bruts pour les matériaux rares ou critiques d'une éolienne sont présentés dans le Tableau 4.

NB : les matériaux rares ou critiques étudiés ici sont ceux identifiés par la Commission Européenne³ pour le secteur de l'énergie éolienne : les terres rares des aimants permanents, en l'occurrence le néodyme (symbole Nd) et le dysprosium (Dy) et les éléments d'alliage des aciers (notamment molybdène).

		Terrestre			Offshore		
Flux matière	Technologies	Asynchrone	Synchrone (électro aimant)	Synchrone (aimant permanent)	Moyenne pondérée des technologies	Moyenne pondérée des technologies	
Hypothèses de répartition des technologies		67%	30%	3%			
Aérogénérateur	Acier fortement allié et acier inoxydable	kg/MW	15 000	25 000	14 000	16 000	29 000
	<i>dont Nickel</i>	kg/MW	240	330	212	254	986
	<i>dont Molybdène</i>	kg/MW	46	63	41	49	200
	<i>dont Chrome</i>	kg/MW	253	347	228	271	1 272
	<i>dont Manganèse</i>	kg/MW	108	142	96	115	196
	Aimant permanent (total)	kg/MW	-	-	160	4,8	200
	<i>dont néodyme</i>	kg/MW	-	-	47	1,4	58
<i>dont dysprosium</i>	kg/MW	-	-	4	0,12	5	
Composés électroniques		kg/MW	<i>Données moyennées pour l'ensemble des technologies</i>			200	200
<i>dont terres rares</i>	kg/MW	0,09				0,09	

Tableau 4 : Résultats analyse flux matériaux rares pour les 6 variantes

Les constats sont les suivants :

- Poids relatif important des éléments néodyme et dysprosium, terres rares entrant dans la composition des aimants permanents et pour l'instant surtout visibles dans les éoliennes maritimes.
- Faible consommation de terres rares par l'électronique des éoliennes.
- Consommation de molybdène et de chrome plus élevée pour l'éolien en mer, dû à l'utilisation d'acier inoxydable.

Résultats pour l'horizon court-terme (2015-2020) :

Avec une hypothèse de cadence d'installation de 1 000 MW par an pour le terrestre et de 600 MW par an pour l'éolien en mer, les estimations en kilotonne (kt) par an de flux de matière entrant dans le parc sont données dans le Tableau 5.

³ Critical Metals in Strategic Energy Technologies – JRC European Commission

		Type de matériaux	Unité	Terrestre	Offshore
Aérogénérateur	Acier	Total	kt/an	75,5	68
		Faiblement allié	kt/an	65,5	51
		Fortement allié	kt/an	8	7
		Acier inoxydable	kt/an	-	3,5
	Fonte		kt/an	17	7
	Cuivre		kt/an	2	1
	Composite		kt/an	8,5	10
	Béton		kt/an	26,5	-
	Aimant permanent	Total	t/an	3	120
		<i>dont Néodyme</i>	t/an	1	35
		<i>dont Dysprosium</i>	t/an	0,08	3
	Total		kt/an	131	84,5
	Fondation	Acier		kt/an	16
Béton			kt/an	336	227
Sable			kt/an		340,5
Total		kt/an	355	681	
Total			kt/an	1047	1759

Tableau 5 : Résultat analyse flux matière pour l'horizon court terme

Résultats pour l'horizon moyen-terme (2020-2025) :

Cet horizon considère la prochaine génération d'éoliennes qui sera installée. Il est donc difficile de prévoir quantitativement l'impact des évolutions technologiques sur les flux de matière. Ces évolutions technologiques seront néanmoins prises en compte en tant que flux entrants, de façon qualitative dans les parties suivantes de l'étude.

Résultats pour l'horizon long-terme (2025-2030) :

En considérant une durée de vie de 20 ans, les flux de matière sortants du parc à horizon 2025 (en kt / an) sont présentés en Figure 3.

Le flux majoritaire est celui d'acier avec une centaine de kilotonnes à traiter par an. En comparaison, le secteur de l'automobile consomme et traite chaque année des volumes d'acier plus de 10 fois supérieurs. Concernant le flux de matière composite, celui-ci oscille entre 5 et 15 kt par an ; le secteur des bateaux de plaisance pour comparaison consomme quant à lui près de 30 kt de composites de même nature.

NB : comme indiqué plus haut, les flux correspondent au parc terrestre actuellement installé à fin 2014. Des estimations d'installations ont été faites pour 2015 et 2016 (cadence d'installation de 1 000 MW par an).

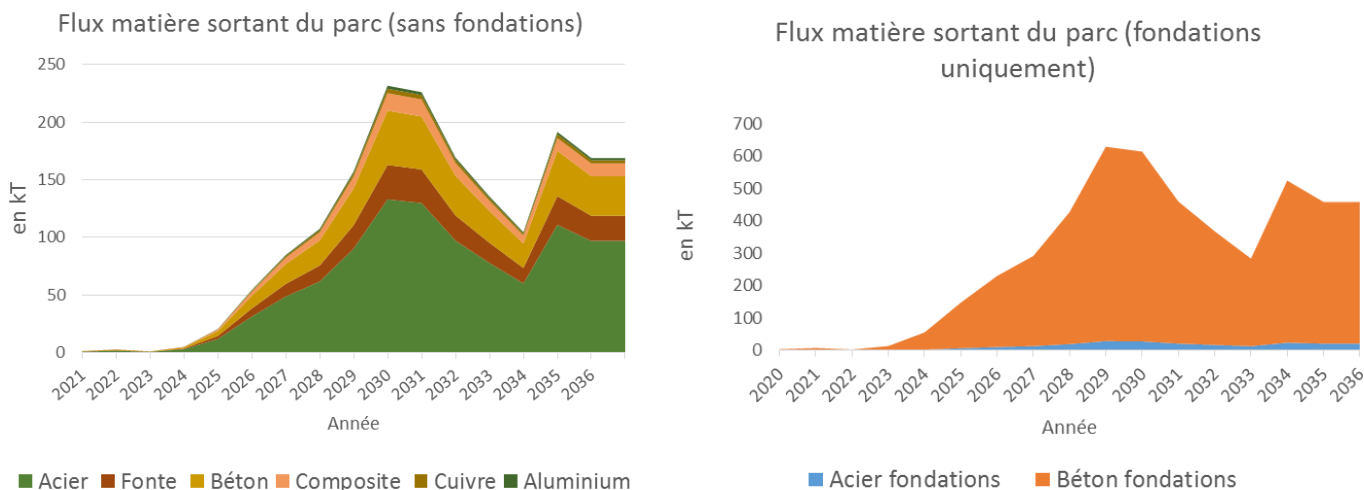


Figure 3 : Résultats analyse flux matière pour l'horizon long terme

2.1.3. Résultats de l'analyse des flux logistiques

a) Données exploitées

Pour l'analyse des flux logistiques, des entretiens auprès de 2 constructeurs et de 2 fabricants de composants majoritaires ont été menés. Ils ont permis d'établir la cartographie simplifiée de la chaîne logistique pour l'éolien terrestre et l'éolien en mer. 4 niveaux de flux logistique ou d'approvisionnement sont distingués :

- Niveau local
- Niveau France
- Niveau Europe
- Niveau Hors Europe

b) Résultats, cartographie de l'approvisionnement pour l'éolien terrestre

L'analyse de flux logistique révèle que la chaîne d'approvisionnement de l'éolien terrestre est majoritairement européenne. L'organisation de cette chaîne est principalement liée à l'optimisation des coûts (le CAPEX d'une éolienne représentant plus de 60% du coût de l'éolien) et la réduction des délais d'approvisionnement.

c) Résultats, cartographie de l'approvisionnement pour l'éolien en mer

La chaîne d'approvisionnement pour l'éolien en mer (Figure 5) est plus locale que celle du terrestre (Figure 4), et ce à cause des contraintes que représentent la gestion et l'acheminement des gros volumes ainsi que les contraintes de logistique maritime. Enfin les conditions des appels d'offres en faveur d'une industrialisation en France ont également eu pour conséquences de localiser cette chaîne d'approvisionnement.

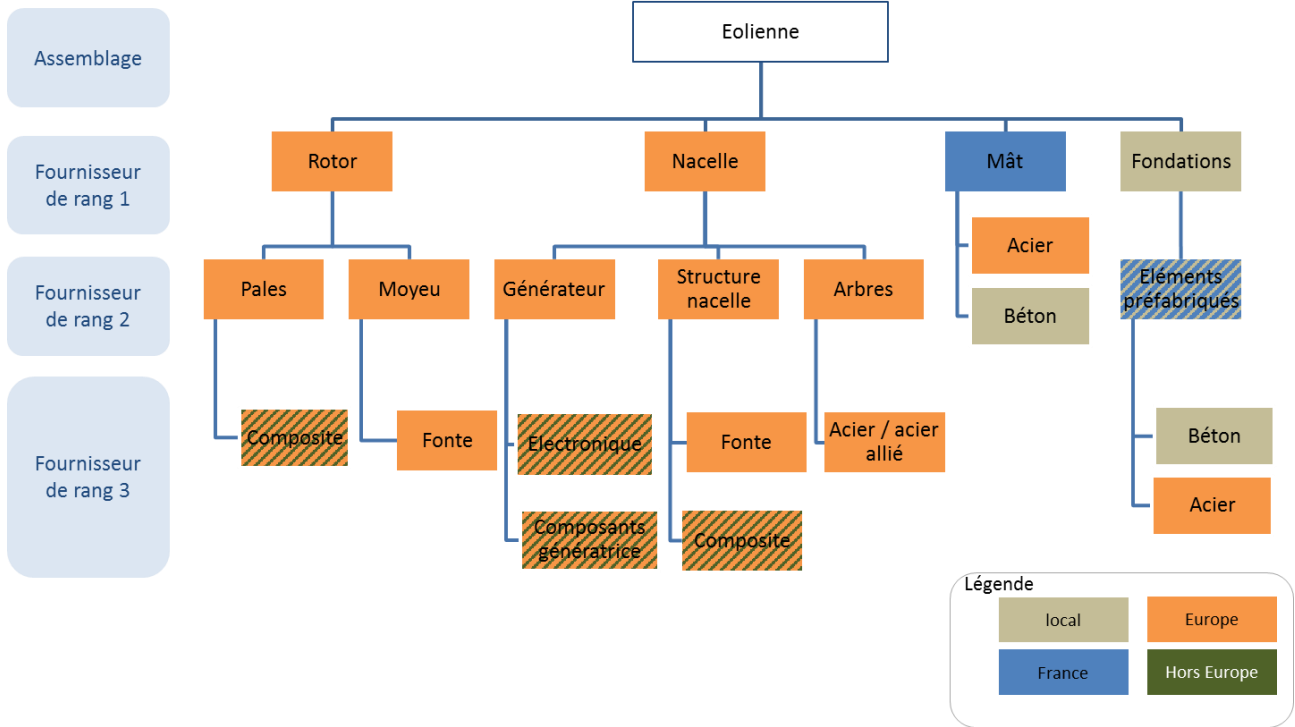


Figure 4 : Flux logistique pour l'éolien terrestre

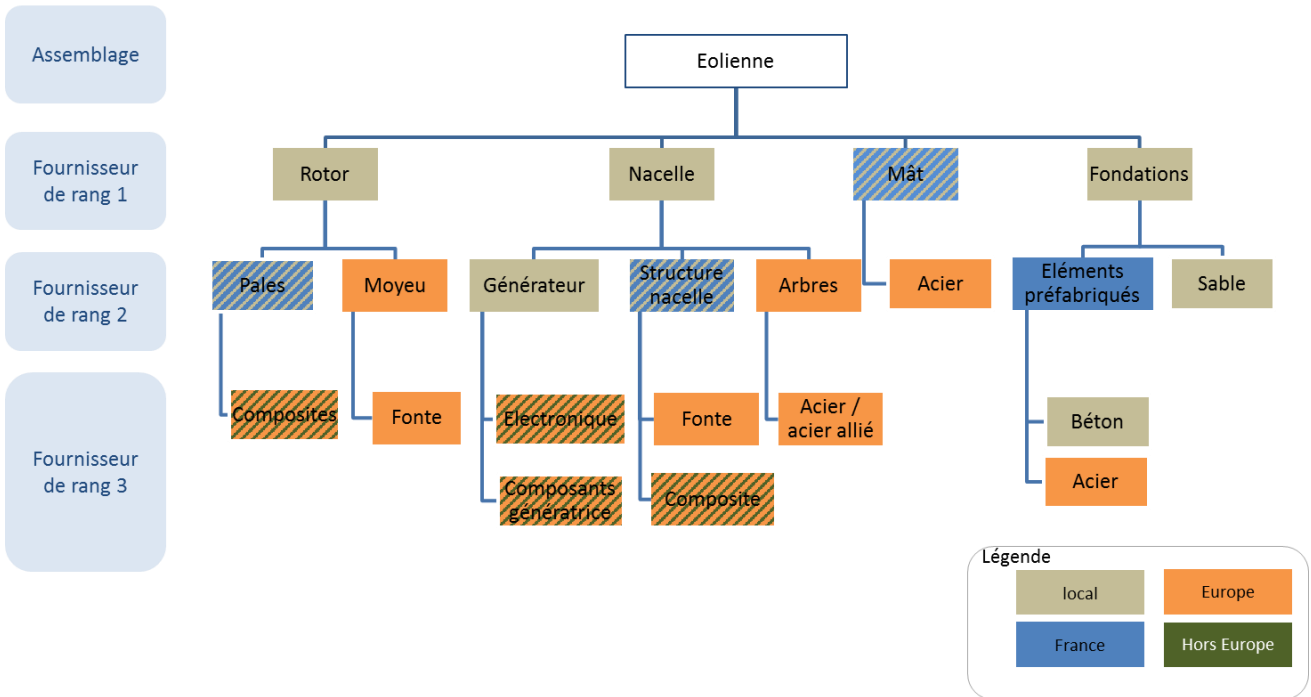


Figure 5 : Flux logistique pour l'éolien en mer

2.1.4. Résultats de l'analyse des flux de service

a) Données exploitées

L'analyse des flux de service a été construite à partir des données recueillies lors des entretiens avec des exploitants ainsi que par le biais de différentes publications de référence⁴. Ils ont permis de dresser une décomposition des différents flux monétaires générés par les activités de service réalisées tout au long de la durée de vie du parc. Les principales activités de services considérées correspondent à la maintenance et au suivi opérationnel du parc éolien terrestre.

NB : l'analyse des flux de service pour l'éolien en mer n'a pas été menée. En effet, le parc en mer français étant en cours de construction, l'absence de retours d'expérience permet difficilement de conduire cette analyse.

b) Résultats

Comme présenté sur les deux graphiques de la Figure 6, le coût d'un parc éolien est réparti entre investissement (en moyenne à 62%) et exploitation/maintenance (à 38%)⁵. Parmi les coûts liés à l'exploitation et la maintenance, on peut distinguer les flux monétaires qui sont mécaniquement et obligatoirement générés sur le territoire (loyer, taxe, opération, frais de fonctionnement), et les flux qui peuvent venir de l'extérieur tels que l'activité de maintenance qui, même si elle a tendance à être effectuée par des techniciens locaux, peut également faire intervenir des acteurs extérieurs. Ce flux de maintenance génère à lui-seul 51% des coûts de l'exploitation et maintenance et représente près de 20% du coût total d'un parc, ce qui en fait une composante non négligeable.

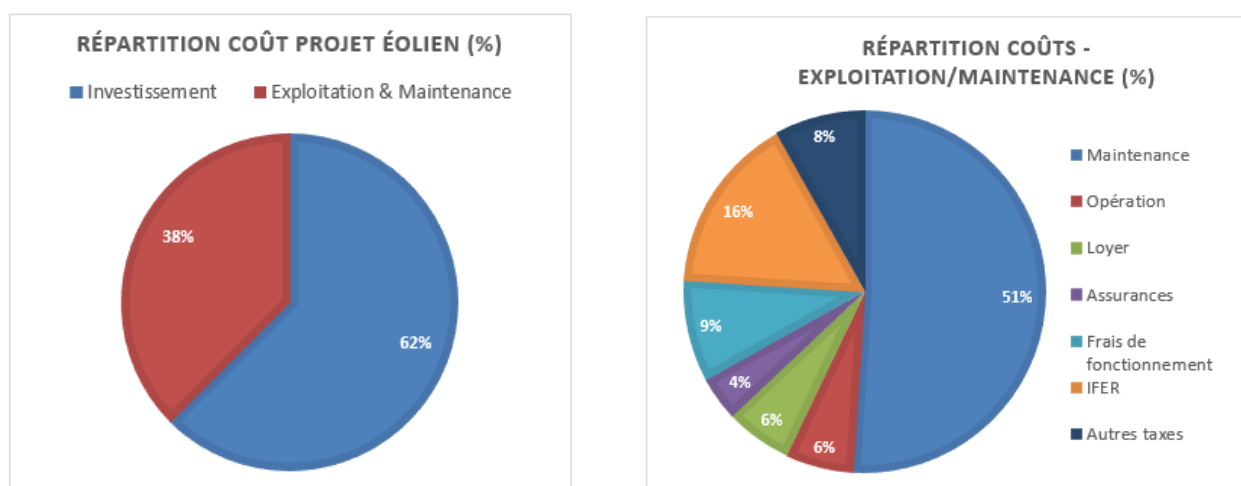


Figure 6 : Résultat de l'analyse des flux de service⁶

⁴ Notamment *The Economics of Wind Energy* réalisé par l'EWEA (2009) et le rapport *Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine* de la CRE (2014).

⁵ Calcul réalisé sans actualisation des coûts à partir des données du rapport CRE « Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine » avril 2014 : le montant total d'investissement est resté stable entre 2008 et 2013, entre 1400k€/MW et 1600k€/MW (valeur fixée à 1500k€/MW pour l'étude, soit 65k€/MW/an en amortissement annuel pour un parc de 20ans), et les coûts d'exploitation et maintenance avoisine les 45k€/MW/an.

⁶ La répartition des coûts d'exploitation et maintenance est extraite du rapport CRE « Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine » (2014).

2.2. Leviers de l'économie circulaire

Afin de générer les enjeux propres au secteur éolien de l'économie circulaire, cette analyse de flux a été croisée avec les **7 leviers de l'économie circulaire**.

Pour rappel, les 7 leviers de l'économie circulaire, tels que définis par l'ADEME, sont les suivants :

- Ecoconception
- Approvisionnement durable
- Allongement de la durée de vie
- Recyclage et valorisation des déchets
- Ecologie industrielle et territoriale
- Economie de la fonctionnalité
- Consommation responsable

Ces 7 leviers combinent des notions environnementales, économiques et sociales. Il est important de noter aussi qu'ils correspondent à deux conceptions **complémentaires** de l'économie circulaire : la dimension « **produit** » avec le principe de bouclage de flux sur le produit (recyclage, durée de vie, ...), et la dimension « **territoriale** » avec le principe de bouclage au niveau géographique (écologie industrielle et territoriale, approvisionnement durable).

2.3. Identification des enjeux de l'économie circulaire pour le secteur éolien

Le croisement de l'analyse de flux aux 3 horizons de temps et des 7 leviers de l'économie circulaire a permis de mettre en évidence 9 enjeux, comme schématisé en Figure 7.

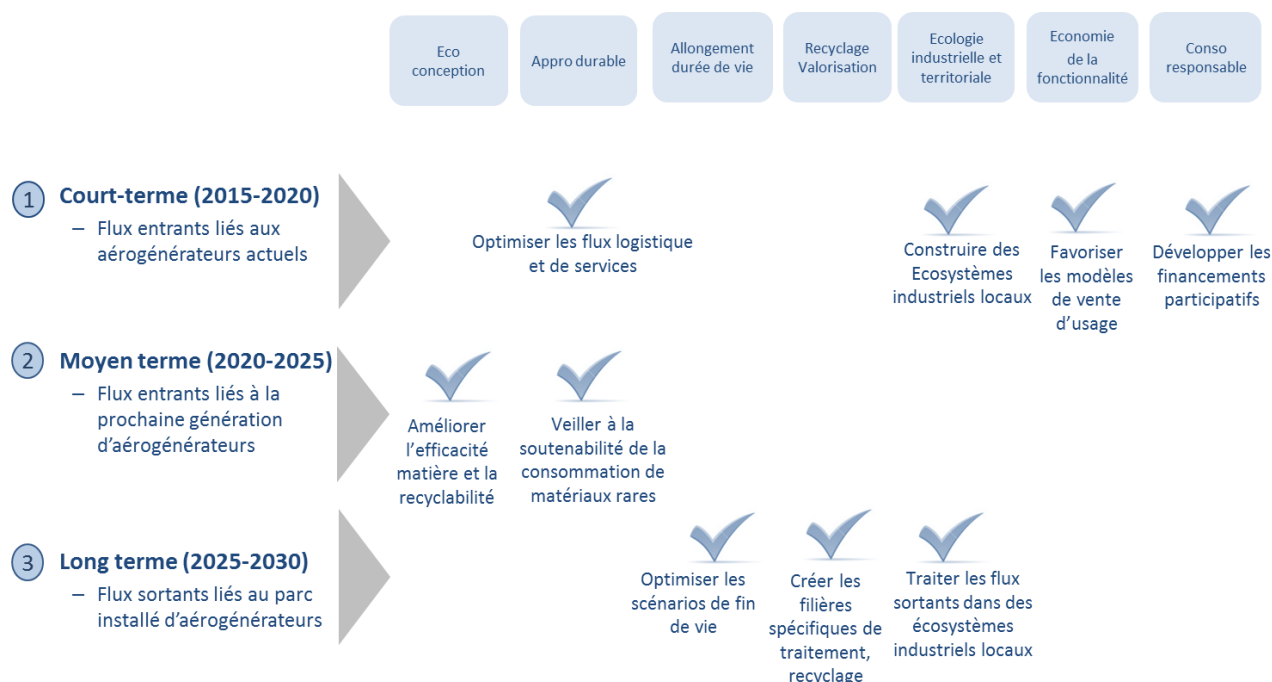


Figure 7 : Identification des enjeux de l'économie circulaire pour l'éolien sur les 3 horizons considérés dans l'étude

2.3.1. Enjeux de l'horizon de court terme

L'horizon court-terme (2015-2020) se fait à « produit constant » et se préoccupe principalement des flux entrants : les enjeux identifiés proviennent donc plutôt des leviers « territoriaux » et sont les suivants.

Enjeu n°1 : Optimiser les flux logistiques et de services

Comme le montre la cartographie des flux logistiques pour l'éolien terrestre (cf Figure 4), en phase « construction », les flux logistiques sont relativement importants tout au long de la chaîne d'approvisionnement, du fournisseur de rang N-2 à l'assemblage final sur le site de production. Ceci s'explique par la localisation des grands constructeurs européens (Allemagne, Danemark...). Diminuer ces flux logistiques en agissant sur l'organisation de la chaîne d'approvisionnement, notamment en localisant plus de valeur ajoutée sur le territoire français, présente des enjeux environnementaux (diminution des impacts du transport), économiques (localisation de la valeur) et sociaux (localisation de l'emploi) importants. Ainsi les questions qui se posent pour cet enjeu sont les suivantes :

- *Y a-t-il des possibilités de rapprocher des étapes au rang N / N-1 pour certains composants (ex: pales, nacelles, tours...) :?*
- *Comment localiser les commandes auprès des fournisseurs français déjà présents sur le territoire ?*
- *Pré-assemblage et stockage : y a-t-il un risque qui pèse sur la disponibilité des espaces portuaires ?*
- *Type de transport : y a-t-il un potentiel pour l'essor du transport fluvial ou maritime des composants ?*

Comme le montre l'analyse des flux de service (cf 2.1.4), en phase « exploitation », les services (maintenance notamment) représentent une part importante du coût total d'un parc (environ 20%) et sont en partie assurés par des prestataires étrangers (souvent issus des grands constructeurs européens). L'optimisation de ces flux de services, en les rendant plus locaux, est donc un enjeu significatif à la fois sur le plan économique et social, mais également sur le plan environnemental par le biais du reconditionnement en local des pièces défectueuses.

Enjeu n°2 : Construire des écosystèmes industriels locaux

Sur l'éolien en mer, l'attribution des appels d'offres a été conditionnée par la création d'écosystèmes industriels locaux (qui peuvent se rapprocher du concept d'*écologie industrielle et territoriale*), et c'est pourquoi on assiste actuellement au développement de ces écosystèmes en Bretagne et en Normandie dans des lieux bien précis.



Figure 8 : Localisation des écosystèmes locaux pour l'éolien en mer

Les questions que soulève cet enjeu sont les suivantes :

- *Comment pérenniser les écosystèmes en cours de construction ?*
- *Quelles synergies peut-il y avoir entre éolien en mer et éolien terrestre (adaptabilité des usines de fabrication, réemployabilité des techniciens, ...) ?*

Sur l'éolien terrestre, en l'absence de grand constructeur français et donc de donneurs d'ordre français, et dans le contexte d'un développement diffus et au fil de l'eau, il n'a pas d'écosystème industriel local majeur qui s'impose : cela est un frein à la compétitivité de la filière française et désoptimise les flux logistiques.

Enjeu n°3 : Favoriser les modèles de vente d'usage de l'éolienne

Même si cet enjeu est la déclinaison du concept de *l'économie de fonctionnalité*, il faut noter que la filière est, d'une certaine manière, déjà dans l'économie de fonctionnalité puisque le client final de la filière est le fournisseur d'énergie qui achète le « kWh éolien », et donc bien l'unité fonctionnelle de la filière, et non un bien matériel.

Sur un autre plan, on peut considérer qu'une application plus poussée de l'économie de fonctionnalité pour le secteur consisterait à ce que le constructeur éolien ne vende pas de turbine à un propriétaire de parc éolien, mais propose un loyer pour la mise à disposition de l'infrastructure énergétique : ceci ne constitue cependant pas un enjeu majeur dans la mesure où le client B2B achète déjà au constructeur une performance de l'éolienne (et raisonne en €/ kWh produit), et par ailleurs il n'y a pas réellement de frein à l'investissement que ce nouveau modèle économique viendrait lever. Nous proposons donc de ne pas retenir cet enjeu pour la suite de l'étude.

Enjeu n°4 : Développer les financements participatifs

Cet enjeu est une déclinaison possible du levier de *consommation responsable*. Dans l'état actuel de l'organisation du marché électrique français, il est difficile de valoriser pour le consommateur final un achat responsable d'électricité d'origine éolienne, et le moyen le plus efficace actuellement utilisé pour actionner le levier de consommation responsable est le développement du financement participatif qui voit les habitants d'un territoire financer directement le développement d'un parc éolien sur ce territoire

Cet enjeu est important pour la filière car il permet aussi d'améliorer l'acceptabilité locale des projets éoliens qui est une problématique cruciale particulièrement en France. Cet enjeu faisant déjà l'objet d'autres études par l'ADEME, il ne sera pas retenu pour la suite de l'étude

2.3.2. Enjeux de l'horizon de moyen terme

L'horizon moyen-terme (2020-2025) se préoccupe aussi des flux entrants mais peut raisonner sur les prochaines générations d'éoliennes : les **leviers « produits »** peuvent donc être activés en **plus des leviers territoriaux**, et les enjeux sont les suivants.

Enjeu n°5 : Améliorer l'efficacité matière et la recyclabilité

L'industrie du secteur éolien est une industrie jeune qui a dû résoudre de nombreux enjeux techniques pour prouver sa résistance et augmenter progressivement les rendements pour abaisser le coût au kWh produit. En conséquence, on peut constater logiquement que le levier de *l'écoconception* a encore peu été appliqué du fait d'autres priorités.

En ce sens, travailler l'efficacité matière des segments est aujourd'hui un enjeu important pour la filière terrestre car, maintenant que les principaux défis techniques ont été remportés, l'écoconception pourrait permettre de résoudre des problématiques environnementales mais aussi de réduire les coûts : l'efficacité matière pourrait réduire le coût d'investissement. L'analyse environnementale d'un profil moyen d'éolien

pendant tout son cycle de vie montre que 70% des émissions de gaz à effet de serre proviennent de la consommation de matière pour la construction de l'éolienne et de ses fondations⁷. Des travaux d'allègement des pales sont en cours depuis quelques années, les raisons techniques primant sur les considérations environnementales. Toutefois, l'allègement d'autres gros composants est à l'étude chez certains constructeurs, par exemple : l'optimisation de l'utilisation des matériaux pour les fondations ou encore l'allègement des tours en acier, qui représentent entre 30 et 65% du poids total de l'éolienne.

L'amélioration de la recyclabilité des segments est également un enjeu crucial dans une logique d'économie circulaire et d'optimisation de l'utilisation des ressources. Par amélioration de la recyclabilité, on entend une amélioration de la démontabilité / séparabilité des matériaux pour une intégration optimale dans les filières de recyclage existantes. Par ailleurs, la revente des matériaux permettrait d'absorber les coûts liés au démantèlement.

Le recyclage étant conditionné par la possibilité de séparation des matériaux, celui-ci est rendu difficile pour certains composants de l'éolienne comme les pales (renforts en fibre de verre non séparables de la matrice en polymère), les composés électroniques (circuits électroniques, composants...), les éléments constitutifs des aimants permanents (terres rares...).

Enjeu n°6 : Veiller à la soutenabilité de la consommation de matériaux rares ou sensibles

Alors que les flux entrants seront significatifs sur la période 2015-2025, et ce pour l'éolien terrestre comme pour l'éolien en mer, la question de la disponibilité des matériaux (par exemple les terres rares pour les aimants permanents utilisés principalement pour l'éolien en mer) se pose, autant en termes de soutenabilité environnementale (épuisement des ressources et atteinte aux milieux naturels sur les lieux d'extraction) qu'en termes économiques (augmentation des prix dans un contexte de rareté).

Les matériaux identifiés comme rares ou sensibles⁸ contenus dans les éoliennes se retrouvent : en quantité négligeables dans les composés électroniques, en quantité non négligeable sous forme de terres rares dans les technologies à aimants permanents (néodyme et dysprosium) et dans les aciers fortement allié et inoxydable (notamment le molybdène).

En ce qui concerne les **terres rares des aimants permanents**, la production mondiale de dysprosium est de 1 000 t/an et est exclusivement assurée par la Chine, ce qui augmente le risque sur l'approvisionnement de cette ressource. Les prévisions européennes 2030 de consommation des terres rares des aimants permanents des éoliennes (néodyme et dysprosium) sont de 4%⁹ de la production mondiale.

Les questions soulevées ici sont les suivantes :

- *Peut-on substituer des matériaux rares ou sensibles par d'autres matériaux / d'autres technologies ?*

2.3.3. Enjeux de l'horizon de long terme

L'horizon long terme (2025-2030) verra arriver les flux liés à la fin de vie des éoliennes : les enjeux seront donc, sur la dimension « produit », liés aux **scénarios de fin de vie de l'éolienne**, et sur la dimension « territoriale », sur les **circuits géographiques de démantèlement** du parc installé

Enjeu n°7 : Optimiser les scénarios de fin de vie

Après 20 ans d'exploitation, la turbine arrive en fin de vie « normale ». Différents scénarios peuvent être envisagés :

- un démantèlement complet du site éolien (voir l'analyse de l'enjeu n°8) ;
- une exploitation prolongée à l'aide d'une maintenance renforcée ;
- un grand carénage / *rétrofit* remplaçant les éléments les plus critiques ;

⁷ Donnée Environmental Product Declaration (EPD) - Siemens

⁸ Source JRC : Critical Metals in Strategic Energy Technologies - 2011

⁹ Données JRC 2014

- un *repowering* qui verrait le site conservé mais rééquipé d'éoliennes plus puissantes et/ou plus efficaces.

Ces différents scénarios ont des enjeux environnementaux importants qu'il est difficile de trancher simplement : un démantèlement complet peut permettre de réduire les impacts grâce à la mise en œuvre d'éoliennes de nouvelle génération plus efficaces en production d'EnR et exploitant de façon plus optimale le gisement de vent disponible, alors qu'une exploitation prolongée a le mérite d'économiser l'utilisation de matériaux neufs.

Enfin, dans le contexte du marché français, les enjeux économiques associés à ces scénarios sont très différents en fonction de différents paramètres que sont l'acceptabilité de nouveaux projets éoliens même sur des sites existants (*repowering*), ou encore la valorisation de l'électricité produite (niveau du tarif d'achat et/ou valorisation sur le marché).

Si le démantèlement conduit à des problématiques de recyclage matière (voir la description de l'enjeu n°8), le *repowering* implique, dans la majorité des cas, le changement de la quasi-totalité des équipements du parc (tours, fondations...). Pratiqué dans des pays comme l'Allemagne, le *repowering* serait assimilé en France à la construction d'un nouveau parc ; c'est pourquoi le *repowering* ne sera pas retenu dans la suite de cette étude. L'allongement de la durée d'usage des éoliennes grâce au remplacement de pièces et à une maintenance renforcée constituent, quant à eux, des leviers intéressants pour cet enjeu.

	Maintenance renforcée	Retrofit (remplacement des pièces critiques)	Repowering
Estimation du % matière remplacé pour augmenter la durée d'usage	1-10%	10-30%	90-100%
Estimation de la durée d'usage atteinte	25 ans	30 ans	40 ans

Figure 9 : leviers pour l'allongement de la durée d'usage des équipements installés

Enjeu n°8 : Créer les filières spécifiques de traitement et de recyclage

Alors que peu d'éoliennes ont déjà été démantelées en France, mais que le processus a déjà commencé en Allemagne, la question se pose d'une valorisation optimale des flux sortants de matériaux, que ce soit l'acier, le béton ou des matériaux plus spécifiques comme les composites des pales ou les terres rares.

L'enjeu est environnemental dans la mesure où, dans une logique d'économie circulaire, il faut essayer de valoriser les matières sortantes en dégradant le moins possible la fonctionnalité de ces matières, et donc notamment éviter les scénarios d'enfouissement ou de valorisation en énergie (incinération).

L'enjeu est aussi économique : il permet de créer un marché des matières premières secondaires et de faire du démantèlement une étape positive au niveau du bilan financier et d'abaisser ainsi le coût du kWh éolien produit

En se fondant sur une durée de vie de 20 ans, les flux de matière sortant du parc se décomposent comme représenté en Figure 10¹⁰.

¹⁰ Données analyse flux matière phase 1

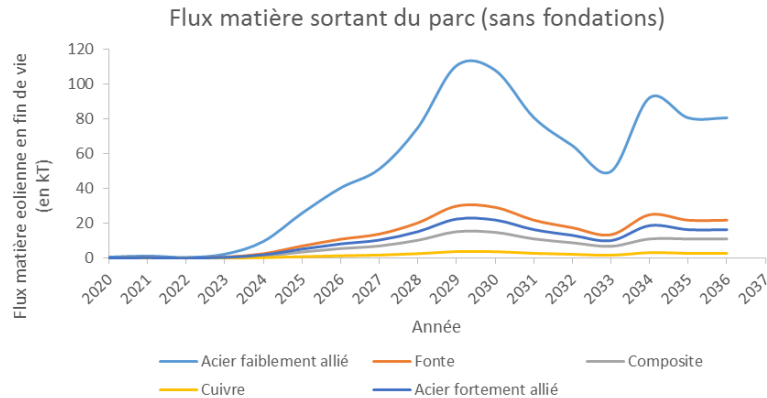


Figure 10 : Détail des flux matière sortant du parc terrestre français

La Figure 11 résume l'état des lieux des débouchés, pour les différentes filières, des principaux matériaux constitutifs des turbines.

	Proportion dans l'aérogénérateur	Existence de filières de recyclage	Débouché actuel
Acier faiblement allié	• ~50%	✓	• Sidérurgie (40% d'acier recyclé incorporé dans la production)-
Acier fortement allié / inox	• ~10%	✓	• Industries diverses (60% d'acier inox recyclé incorporé dans la production)*
Composite	• 5 à 10 %	• Peu / pas de filière	• Valorisation énergétique, quelques cas de valorisation matière dégradée
Composés électrique / électronique	• 5 à 10%	✓	• Débouchés filière DEEE
Terres rares	• < 1 %	• Peu / pas de filière	• -
Béton	• Fondations	✓	• Sous-couches routières

Figure 11 : Etat des lieux des filières de recyclage pour les principaux matériaux de l'éolienne

Concernant les métaux (acier faiblement allié, fortement allié, fonte), des filières de recyclage permettant l'obtention d'un matériau à qualité identique sont déjà en place pour d'autres industries telles que l'automobile ou d'autres équipements. Ces filières sont donc bien implantées et ne seront pas détaillées dans la suite de cette étude. Il n'existe cependant pas ou peu de **filières de recyclage pour les composites** (constitutifs des pales), ce qui constitue un challenge pour le secteur.

En ce qui concerne les petits volumes, pour les métaux utilisés en dispersifs (aluminium et cuivre ; moins de 2% du poids total de l'éolienne), des filières sont également bien en place mais un effort important de tri lors du démantèlement devra être mis en œuvre pour assurer un recyclage optimal de ces matières. Pour les déchets électriques et électroniques (cartes électroniques, câbles...) des filières existent (Déchets Electriques et Electroniques - DEEE). Toutefois **peu de solutions de recyclage sont actuellement disponibles pour traiter les aimants permanents des éoliennes** en fin de vie, même si des filières de

traitement des terres rares s'organisent pour d'autres applications (aimants permanent des batteries ou des lampes basses consommations¹¹ ...).

Enjeu n°9 : Traiter les flux sortants dans des écosystèmes industriels locaux

Sur le volet territorial, il peut être intéressant d'imaginer comment cette étape de fin de vie peut créer une activité pérenne et compétitive sur le territoire. En effet, une chaîne de valeur entière commence par le démantèlement sur site, puis le démontage plus poussé (en d'autre terme, le tri), et enfin les filières de valorisation des différents composants (les possibilités de valorisation incluent le réemploi, la remise en état par reconditionnement, la valorisation de matière, la valorisation énergétique).

De manière symétrique à l'étape de construction des turbines, la création d'un écosystème industriel local concentrant l'ensemble de cette chaîne de valeur sur un territoire permettrait d'optimiser les flux logistiques mais aussi de renforcer l'efficacité de cette chaîne de valeur (maximisation du taux de valorisation) et de créer de la valeur ajoutée locale et des emplois de manière pérenne. Pour la suite de l'étude, cet enjeu peut donc être rapproché de l'enjeu de création d'écosystème industriel local pour la construction.

En synthèse, nous proposons donc de retenir les 6 macro-enjeux suivants qui correspondent aux enjeux stratégiques de l'économie circulaire pour le secteur éolien :

- Optimiser les flux logistiques et de services
- Construire et pérenniser des écosystèmes industriels locaux
- Améliorer l'efficacité matière et la recyclabilité
- Veiller à la soutenabilité de la consommation de matériaux rares
- Optimiser les scénarios de fin de vie
- Créer les filières spécifiques de traitement et de recyclage

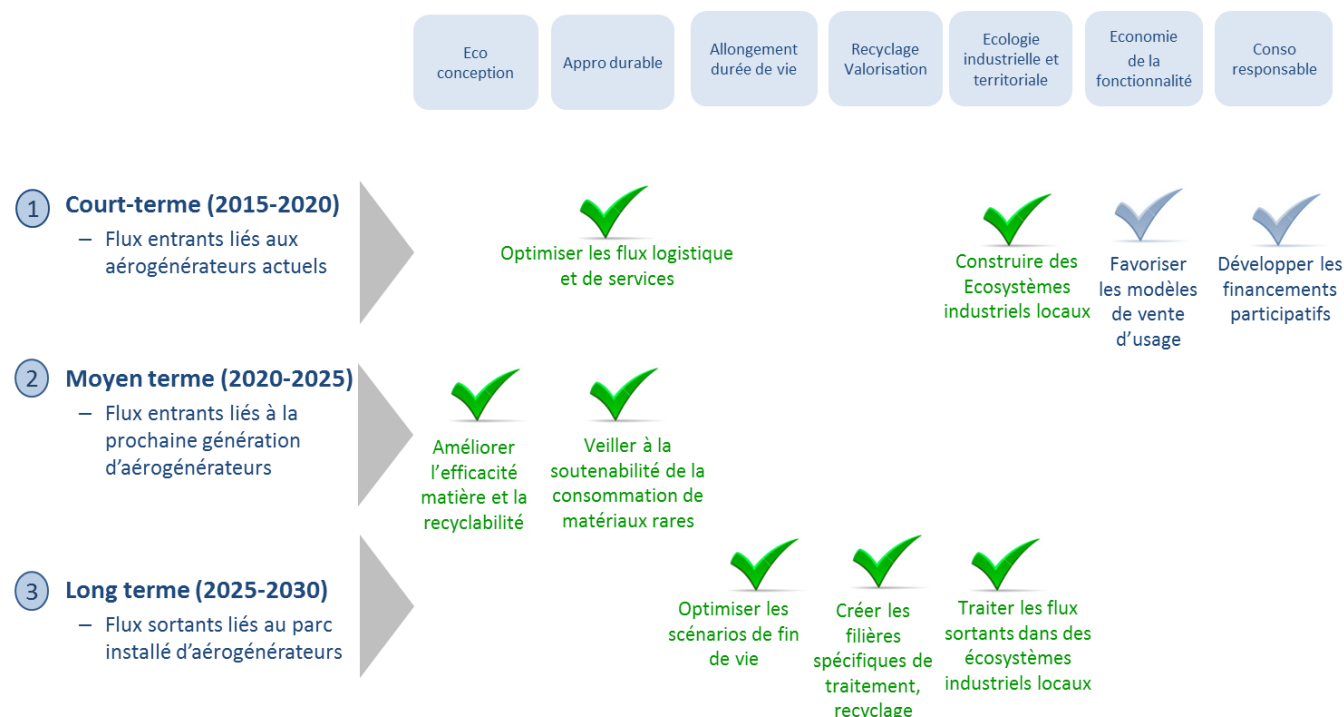


Figure 12 : Sélection des enjeux de l'économie circulaire pour étude approfondie

¹¹ Exemple avec le projet ANR MATETPRO (mars 2014) pour la récupération / le recyclage des aimants permanents des DEEE

3. Identification et sélection des opportunités

Les entretiens réalisés et l'analyse des enjeux ont permis d'identifier une première liste de 17 opportunités, qui ont été analysées qualitativement et ont permis de valider l'opportunité que représente globalement l'économie circulaire pour le secteur éolien. 6 opportunités ont ensuite été sélectionnées pour être approfondies et analysées de manière plus approfondie.

3.1. Identification et analyse des opportunités

Les 6 macro-enjeux ont permis de générer 17 opportunités qui ont fait l'objet d'échanges avec les acteurs du secteur éolien. Il faut noter que certaines opportunités permettent de répondre à plusieurs enjeux. L'ensemble de ces opportunités est présenté en Figure 13.



Figure 13 : Enjeux et opportunités de l'économie circulaire pour le secteur éolien

Chacune de ces 17 opportunités est décrite ci-dessous de manière succincte. Une première analyse qualitative de leur attractivité mais aussi de leur faisabilité est présentée, sachant que la suite de l'étude se concentrera sur 6 opportunités parmi les plus importantes.

1

Favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de maintenance et reconditionnement

Levier

Ecologie Industrielle et Territoriale

Phase du cycle de vie

Exploitation

Description		Flux concernés
Développer l'offre de service pendant la phase d'exploitation de l'éolienne grâce à l'émergence de prestataires locaux à fort niveau d'expertise ; localiser le reconditionnement des pièces remplacées.		Flux de services (maintenance et prestations de reconditionnement)
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
<p>Gain économique : la localisation des prestations de services pendant l'exploitation permet de capter la valeur économique de cette activité, actuellement majoritairement captée par les constructeurs européens</p> <p>Gain environnemental : le reconditionnement local permet d'une part d'augmenter le taux de reconditionnement, et d'autre part de limiter le transport de ces pièces.</p>		<p>Freins de marché : mise en place de contrat spécifiques entre exploitants et constructeurs</p> <p>Verrous techniques : nécessité d'une montée en compétence des acteurs locaux pour la maintenance d'un parc éolien comportant des variantes technologiques.</p>
Commentaire		
De plus en plus d'exploitants affichent la volonté de gérer les activités de maintenance en interne.		

2

En phase exploitation, favoriser les méthodes de maintenance *low technology* /intensive en emploi

Levier

Approvisionnement durable

Phase du cycle de vie

Exploitation

Description		Flux concernés
Favoriser les maintenances intensives en main d'œuvre en limitant l'utilisation d'équipement spécifique.		Flux de services (maintenance)
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
<p>Gains sociaux : Permet la création d'emplois locaux et avec des niveaux de compétences variés</p> <p>Gains environnementaux : permet de limiter le transport d'équipements spécifiques</p>		Verrous techniques : la complexité de la maintenance des éoliennes ne permet pas une maintenance <i>low technology</i> généralisée
Commentaire		
Cette opportunité apparaît comme secondaire par rapport aux autres opportunités		

3

Augmenter la capacité de production des tours en France pour favoriser les achats locaux de tours

Levier

Approvisionnement durables

Phase du cycle de vie

Construction

Description		Flux concernés
Assurer une disponibilité de l'offre des tours (acier et béton) en France permettant d'absorber les commandes de la majorité des constructeurs actifs sur le parc terrestre afin d'augmenter la part d'achats locaux de tours		Flux logistique
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
Gain social : emplois locaux suite à la création de l'activité de production des tours Gain économique : réduction des coûts de transport Gain environnemental : réduction des impacts environnementaux associés aux transports des tours		Freins de marché : Fluctuation des commandes sur le marché de l'éolien terrestre
Commentaire		
Les tours sont l'étape de la chaîne de valeur qu'il est le plus logique de localiser. Cette opportunité contribue de manière majeure à l'enjeu d'optimisation des flux logistiques et de services		

4

Favoriser les achats locaux sur des composants non stratégiques / secondaires

Levier

Approvisionnement durables

Phase du cycle de vie

Construction/
Exploitation

Description		Flux concernés
Favoriser l'achat en France des composants non stratégiques pour l'éolien de type boulons, vis, câbles, ascenseurs de la tour...		Flux logistique
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
Gain social : emplois locaux suite à l'augmentation de commande de composants non stratégiques Gain environnemental : réduction des impacts liés au transport		Freins de marché : Le choix des fournisseurs pour ces composants est contraint par les donneurs d'ordres européens (Allemagne, Danemark...)
Commentaire		
Au vu des quantités des composants secondaires par rapport aux composants majoritaires (tours, génératrice, pales...) ce sujet ne constitue pas une priorité pour la filière.		

5

Faire émerger un grand ensemble français sur l'éolien terrestre pour optimiser la chaîne de valeur et les flux

Levier

Approvisionnements durables / éco
conception / Ecologie Industrielle

Phase du cycle de vie

Construction/
Exploitation

Description		Flux concernés
Contribuer à l'émergence d'un ensemble, intégré sur les composants nacelle et rotor en France pour l'éolien terrestre, en concurrence avec les autres grands constructeurs des pays voisins.		Flux logistique
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
Gain environnemental : réduction des impacts du transport, optimisation des synergies construction / fin de vie		Nécessité d'une rapide montée en compétence pour pouvoir concurrencer les constructeurs actuels, dans un secteur très compétitif.
Gain social : emplois locaux suite à la création de l'activité intégrée de l'ensemble		
Commentaire		
Cette opportunité permet de lever de nombreux freins à l'économie circulaire dans l'éolien ; le rôle de tête de file est majeur pour l'ensemble des leviers de l'économie circulaire.		

6

Renforcer les hubs secondaires (terrestre / autres secteurs) et créer un vrai hub éolien terrestre

Levier

Ecologie industrielle et territoriale

Phase du cycle de vie

Construction

Description		Flux concernés
Pérenniser les initiatives de partage de compétences et d'expériences au sein de la filière éolienne, et créer un centre de compétences de premier plan pour renforcer la montée en compétence des acteurs français		Tous types de flux
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
Gains sociaux et économiques : renforcement de la compétitivité de la filière		Compétition entre les territoires Pas de constructeur majeur français
Commentaire		
Des initiatives en ce sens sont déjà développées (ex : le Centre d'Expertise et de Valorisation de l'Eolien (CEVEO), le cluster 'Wind for Future' en Bourgogne, Windustry par le SER...), cependant la compétition territoriale n'aide pas à centraliser la compétence		

7

Pérenniser les plateformes de fabrication des éoliennes maritimes avec le démantèlement des parcs terrestres

Levier

Ecologie industrielle et territoriale

Phase du cycle de vie

Fin de vie

Description		Flux concernés
Utiliser le savoir-faire et les installations industrielles développées pour l'éolien en mer pour gérer le démantèlement des parcs éoliens terrestres en France, pour ainsi pérenniser l'outil industriel maritime en cours de construction et éviter un démantèlement de manière désordonnée et potentiellement en ayant recours aux filières déjà structurées comme les filières du Nord de l'Europe,		Tous types de flux
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
Gains sociaux : maintien de l'activité des plateformes de l'éolien en mer et pérennité des emplois Gains environnementaux : coûts environnementaux du transport limités et réinjection sur le marché français facilité des composants en fin de vie (recyclage / réutilisation)		Verrous technologiques - Différences techniques entre fabrication et démantèlement - Spécificité de l'éolien en mer par rapport au terrestre
Commentaire		
Cette opportunité a l'avantage d'adresser plusieurs enjeux : développement de filières de traitement et pérennisation des écosystèmes industriels locaux récemment créés		

8

Favoriser l'efficacité matière sans réduire la durée de vie

Levier

Ecoconception

Phase du cycle de vie

Construction

Description		Flux concernés
Alléger les éléments de structure et diminuer le poids des machines tout en garantissant le maintien des caractéristiques techniques des turbines pendant toute leur durée de fonctionnement.		Flux matière (tous types de matériaux)
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)
Gain économique et environnemental : la diminution des matières premières utilisées conduit à la diminution des coûts d'achat de matière et de la pression sur les ressources		Maturité technologique : l'âge moyen des machines en place (moins de 20 ans) ne permet qu'un faible retour d'expérience sur le lien entre efficacité matière et performance en fin de vie.
Commentaire		
Bien que certains constructeurs aient initié des travaux sur l'efficacité matière, cette problématique relève plus de l'amélioration continue que d'un axe structurant, d'autant plus que la tendance est à l'augmentation de la durée de vie des machines.		

9

Développer la recherche sur les pales pour améliorer leur recyclabilité

Levier

Ecoconception

Phase du cycle de vie

Fin de Vie

Description	Flux concernés
Améliorer le potentiel et la qualité du recyclage des pales dès leur conception : les composites utilisés à l'heure actuelle ne permettent pas, en fin de vie, d'avoir recours à des solutions de recyclage matière à qualité identique (c'est-à-dire pour refaire des composites).	Flux matière (matériau composite)
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)
Gain environnemental : conservation de la qualité et de la fonctionnalité des matériaux composites après recyclage	<ul style="list-style-type: none"> Maturité technologique : les pales étant soumises à de fortes contraintes mécaniques, la marge de manœuvre pour le choix des matières et leur mode de fabrication pour une meilleure recyclabilité est restreinte. Contraintes réglementaires : absence de critères environnementaux
Commentaire	
Des acteurs ont initié des travaux sur l'amélioration de la recyclabilité des pales, qui constitue un axe important de recherche. Toutefois, l'étude de cette opportunité n'est pas pertinente à ce stade, au vu de l'avancée de ces travaux encore très préliminaires.	

10

Favoriser l'utilisation de matériaux recyclés ou issus de ressources renouvelables

Levier

Ecoconception

Phase du cycle de vie

Construction

Description	Flux concernés
Intégrer des matières recyclées ou biosourcées pour les différents matériaux constitutifs des turbines et de leurs fondations.	Flux matière <ul style="list-style-type: none"> Matière recyclée (ex aciers recyclés pour les tours) Matière issue de ressources renouvelables (ex bois pour les mâts, fibres végétales pour les renforts des pales)
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)
Gain environnemental : diminution de la pression sur les ressources vierges et non renouvelables	Maturité technologique : Les fortes contraintes mécaniques auxquelles sont soumis les éoliennes ne permettent pas une grande marge de manœuvre pour le choix des matériaux et très peu de solutions recyclés/biosourcés sont disponibles
Commentaire	
Bien que certains constructeurs aient initié des travaux sur l'intégration des matériaux recyclés/biosourcés, actuellement très peu de projets sont concluants et réalistes.	

11

limiter la consommation de balsa dans les pales

Levier

Ecoconception

Phase du cycle de vie

Construction

Description		Flux concernés
Réduire la quantité de balsa, utilisé pour sa structure particulière, sa légèreté et sa résistance dans l'ossature des pales. Ce matériau provient principalement des arbres des forêts d'Amérique Centrale et du Sud.		Flux matière (Balsa)
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)	
Gain environnemental : réduire la pression sur une ressource localisée et lointaine	Maturité technologique : l'utilisation de balsa permet d'alléger les pales, pas / peu de projets pour sa réduction sont menés ou rendus disponibles	
Commentaire		
La tendance actuelle étant à l'optimisation du poids des pales dont le diamètre est de plus en plus grand. Malgré une faible disponibilité des données relatives à l'utilisation de cette matière dans l'éolien, il est pressenti que les proportions de balsa par rapport à l'ensemble des matériaux de l'éolienne ne sont pas majoritaires. Cette opportunité n'est pas prioritaire.		

12

Réduire la consommation de terres rares dans les génératrices

Levier

Ecoconception

Phase du cycle de vie

Construction

Description		Flux concernés
Réduire la part des terres rares dans la composition des aimants permanents des génératrices (principalement utilisées dans les éoliennes en mer), pour se détacher des contraintes pesant sur les terres rares (réserves non connues contrôlées par un seul pays).		Flux matière : principalement néodyme et dysprosium
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)	
Gain environnement : diminution de la consommation de matière non renouvelable et peu abondante / critique Gain économique : réduction du coût matière	Verrous technologiques : Les installations maritimes doivent pouvoir fonctionner avec la plus grande autonomie, ce qui est possible avec la technologie à aimants permanents. Peu de solutions alternatives, avec ce degré d'autonomie, existent.	
Commentaire		
Les prévisions européennes à 2030 de consommation des terres rares des aimants permanents des éoliennes (néodyme et dysprosium) sont de 4 ¹² % de la consommation totale de ces matières. Les constructeurs sont conscients de cette problématique et des améliorations sont déjà en cours (réduction de près de 30% de terres rares dans les aimants actuels).		

¹² Données JRC 2014

13

Favoriser le modèle d'affaire de l'extension de la durée de vie

Levier

Allongement de la durée d'usage

Phase du cycle de vie

Fin de vie

Description	Flux concernés
Favoriser l'extension de la durée de vie des parcs éoliens, dans une logique d'optimisation économique et environnementale des actifs physiques déjà installés.	Flux matière
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)
<p>Gain environnemental : prolonger la durée d'usage permet « mécaniquement » d'améliorer la performance environnementale par kWh produit (impact environnemental en grande partie fixe et lié à l'infrastructure initiale).</p> <p>Gain économique : prolonger la durée d'utilisation des machines permet de limiter les « investissements lourds » mais aussi de s'assurer de l'acceptabilité de la production.</p>	Freins de marché : vendre la production d'électricité sur le marché (et non plus à travers les tarifs d'achat) suppose une montée en compétence des exploitants et/ou le recours à des intermédiaires (type agrégateurs).
Commentaire	
Cette opportunité est le scénario de fin de vie, qui dans le contexte français, permet de mieux répondre à l'enjeu « Optimisation des scénarios de fin de vie ».	

14

Organiser un marché de « seconde main » des éoliennes

Levier

Allongement de la durée d'usage

Phase du cycle de vie

Fin de vie

Description	Flux concernés
Permettre la réutilisation complète des éoliennes (tours, pales, génératrices) issues des parcs français reconstruits	Flux matière
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)
<p>Gains économiques : Permet un retour sur investissement de l'éolienne en fin de vie pour celui qui la vend et permet l'accès à cette technologie à moindre frais pour celui qui l'achète.</p> <p>Gain environnemental : Prolonger la durée d'usage (avec un autre propriétaire) diminue d'autant l'impact sur la durée de vie.</p>	<p>Freins réglementaires : L'utilisation d'éoliennes de seconde main n'est actuellement envisageable qu'en dehors de la France</p> <p>Verrous techniques : Une éolienne étant dimensionnée par rapport aux contraintes du site d'implantation d'origine, sa réutilisation sur un autre site ne permettra pas une pleine exploitation du gisement de vent</p>
Commentaire	
Dans le contexte de faible acceptabilité de nouveaux parcs éoliens, les acteurs s'orientent plutôt vers l'extension de la durée d'exploitation (cf. opportunité précédente), ce qui réduit le marché pour des éoliennes de seconde génération.	

15

Structurer une filière pour le recyclage des pales

Lever

Recyclage / Valorisation

Phase du cycle de vie

Fin de vie

Description	Flux concernés
Développer une filière permettant la régénération de matière première secondaire à partir de la matière composite des pales en fin de vie (recyclage matière à qualité dégradée, pour utilisation dans la construction par exemple)	Flux matière (matériaux composites)
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)
Gain économique : création de valeur économique grâce à la revente de matière première secondaire Gains environnementaux : évitement de la génération de déchets ultimes et de la production de matière vierge	Verrous technologiques : les solutions techniques actuellement disponibles ne permettraient pas d'absorber les flux de matériaux composites sortant des parcs démantelés
Commentaire	
Cette opportunité correspond vraiment à la principale spécificité de l'éolien en termes de matériaux à traiter ou valoriser. De plus les pales représentent une grande partie de la valeur et de la matière d'une turbine.	

16

Structurer une filière pour la valorisation des terres rares

Lever

Recyclage et valorisation

Phase du cycle de vie

Fin de vie

Description	Flux concernés
Permettre le recyclage des terres rares des aimants permanents des génératrices (éoliennes en mer principalement), qui constituent une source de valorisation importante en fin de vie.	Flux matière (terres rares)
Attractivité (bénéfices principaux)	Faisabilité (freins principaux)
Gains environnementaux : évitement de la génération de déchets ultimes et évitement de l'extraction de terres rares vierge Gain économique : valorisation économique matière	
Commentaire	
Au vu de la valeur des terres rares, nul doute qu'un processus de valorisation sera mis en place, sachant que les technologies sont connues	

Favoriser l'intégration des filières de recyclage pour les aciers alliés

Levier	Recyclage et valorisation	Phase du cycle de vie	Fin de vie
Description		Flux concernés	
Permettre le recyclage des aciers constitutifs des différents composants de l'éolienne (tour, structure...) grâce aux filières de recyclage déjà en place pour d'autres secteurs.		Flux matière (acier allié)	
Attractivité (bénéfices principaux)		Faisabilité (freins principaux)	
Gains environnementaux : évitement de la génération de déchets ultimes et évitement de la production d'acier vierge			
Commentaire			
Les aciers utilisés dans l'éolien ne présentent pas de spécificités significatives pour ne pas être intégrées dans les filières de recyclage acier déjà existantes, le degré d'alliage utilisés étant fréquemment rencontré dans d'autres industries.			

3.2. Sélection des opportunités à approfondir

Parmi ces 17 opportunités, un zoom a été effectué sur 6 opportunités particulièrement stratégiques, c'est-à-dire des opportunités qui sont d'une part très attractives, et d'autre part qui ont un bilan attractivité / faisabilité positif.

Sur la base de l'analyse qualitative présentée plus haut, les 17 opportunités ont été placées sur une matrice Attractivité / Faisabilité (voir Figure 14).

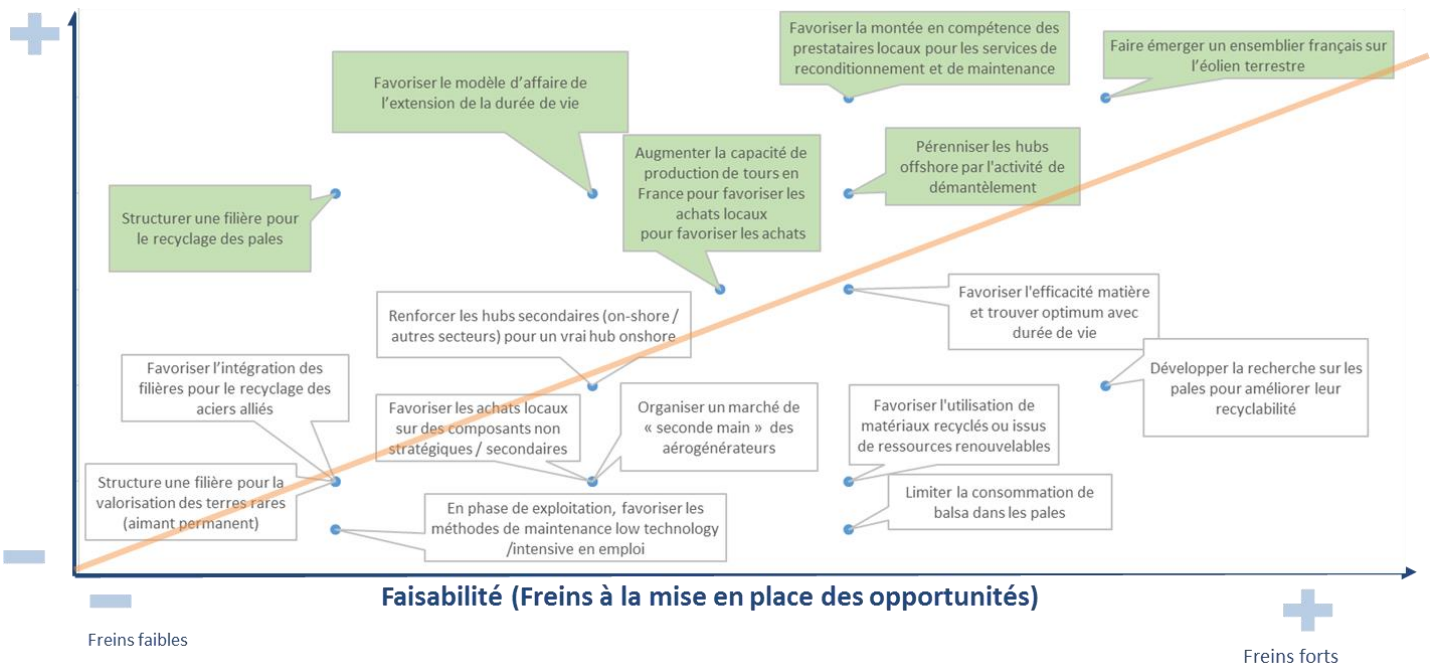


Figure 14 : Matrice Attractivité / Faisabilité des 17 opportunités

On voit ainsi se distinguer 6 opportunités particulièrement stratégiques sur lesquelles une analyse approfondie est réalisée (atouts et risques, évaluation des bénéfices, identification des freins et pistes pour un plan d'action ADEME) :

- **Structurer une filière pour le recyclage des pales**
- **Favoriser le modèle d'affaire de l'extension de la durée de vie**
- **Favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de reconditionnement et de maintenance**
- **Pérenniser les plateformes de fabrication de l'éolien en mer par l'activité de démantèlement**
- **Augmenter la capacité de production de tours en France pour favoriser les achats locaux**
- **Faire émerger un ensemble français sur l'éolien terrestre pour optimiser la chaîne de valeur et les flux**

4. Evaluation qualitative des opportunités retenues

4.1. Structurer une filière pour le recyclage des pales

4.1.1. Eléments de contexte

Dans l'éolien terrestre, les pales pèsent pour 8% du poids total de l'éolienne¹³, ce qui représente une dizaine de tonnes de matériau composite par mégawatt. En 2014, le parc terrestre français représentait 8 860 MW soit un gisement de près de 100 000 tonnes de pales en composite.

A partir de 2025, le démantèlement des parcs terrestres français s'enclenchera et les volumes annuels de matière à traiter augmenteront. Il existe des filières de traitement et de recyclage pour la plupart des matériaux constitutifs d'une éolienne (fondations, tours acier...), mais à l'heure actuelle, il n'existe pas de solution industrielle capable d'absorber les volumes à venir de composites des pales.

En effet, en se fondant sur l'évolution des puissances installées depuis 2005 et en considérant une durée de vie des éoliennes de 20 ans, les quantités de matière composites provenant des pales démantelées oscilleront entre 3 et 15 kt de matière par an (voir Figure 15). En comparaison, l'estimation des composites en provenance des bateaux de plaisance serait de 30 kt par an

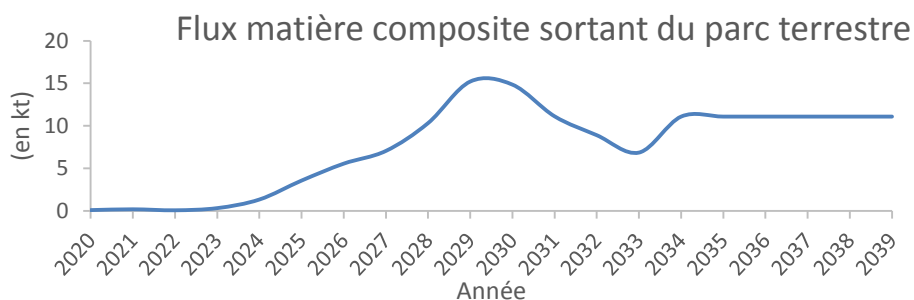


Figure 15 : Flux matière composite des pales sortant du parc (en kt)

Actuellement, les pales démantelées et broyées sont principalement envoyées en valorisation énergétique, certaines mises en décharge ce qui génère des coûts de traitement pour les exploitants, comme illustré en Figure 16.

¹³ Poids sans fondations, données analyse des flux | Care

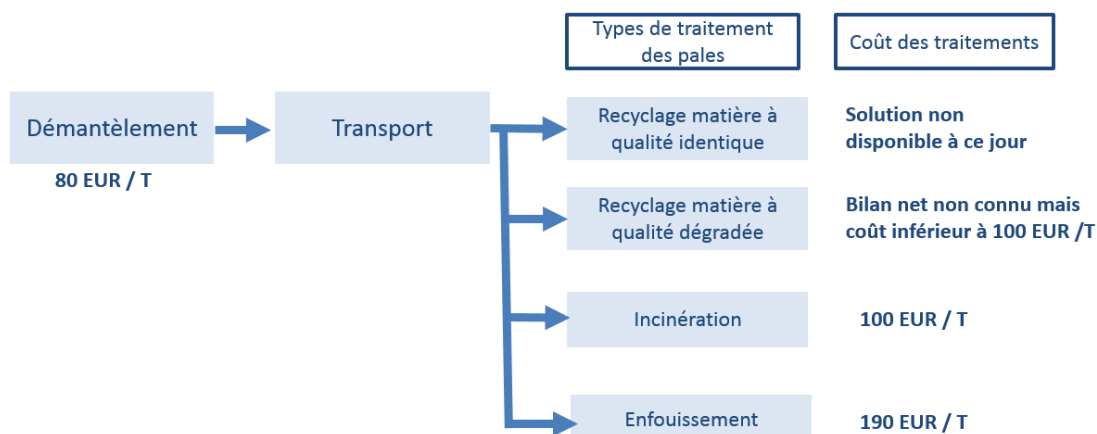


Figure 16 : Possibilité de traitement des pales en fin de vie et coût associés

Les matières composites des pales d'éoliennes se composent de :

- **Matrice en résine thermodurcissable**, représentant environ $\frac{1}{4}$ du poids total des pales : principalement époxy, dans certains cas polyester (cas des pales de LM Wind Power) ou plus à la marge vinylester ;
- **Renforts**, représentant environ $\frac{3}{4}$ du poids des pales principalement en fibres de verre. On observe une tendance à l'utilisation de fibres de carbone pour les pales de grande longueur : les fibres de carbone contribuent à alléger les structures, leur utilisation est réservée aux grandes dimensions (cas de charges mécaniques importantes) car elles sont de 10 à 50 fois plus chères que le verre.

Les composites sont utilisés dans d'autres secteurs : automobile, bateaux de plaisance, aéronautique... Dans l'éolien, ils restent un matériau de pointe utilisé pour ces bonnes caractéristiques techniques, dont résistance et légèreté.

Les initiatives en cours pour des solutions de recyclage de composite sont encourageantes. On citera un exemple français, l'entreprise AB Val composites, en cours de développement¹⁴, qui traitera 1 000 tonnes de composites (polyester/fibre de verre) par an pour produire des matériaux recyclés utilisables dans la construction (appuis de fenêtre, etc.) ou encore dans les travaux publics (par exemple pour les murs anti-bruit).

Dans une économie circulaire, le recyclage tient une place privilégiée en permettant de mettre à disposition de la matière sans consommer de ressources. Dans cette logique et au vu des gros volumes que représente l'éolien, l'émergence d'une filière pour le recyclage des pales en composite apparaît comme une opportunité forte pour le secteur.

4.1.2. Description de l'opportunité

L'opportunité décrite consiste à **structurer une filière pour le recyclage des pales en matière composite**. On entend ici par recyclage le procédé qui permet de régénérer de la matière première secondaire à partir de la matière composite des pales en fin de vie. Les procédés permettant l'obtention d'une matière composite recyclée pour une utilisation à qualité identique aux matériaux composites « vierges » n'étant pas encore matures (voir l'opportunité « Développer la recherche sur les pales pour améliorer leur recyclabilité »), on supposera ici que la matière première secondaire générée par les procédés actuellement ou prochainement disponibles pourra être utilisée notamment comme substituts de matériaux de construction.

¹⁴Source ADEME : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ab-val-composites.pdf>

4.1.3. Atouts et risques de l'opportunité

Cette opportunité permet de **répondre à l'enjeu de création de filière de traitement et recyclage spécifique au secteur de l'éolien** : les pales composites sont en effet les seuls composants importants en volume ne disposant pas actuellement de filière mature.

Le traitement des composites par un procédé de recyclage crée de la valeur contrairement aux procédés dits « ultimes » comme la mise en décharge ou la valorisation énergétique puisqu'ils permettent :

- la création de valeur économique grâce à la revente de matière première secondaire ;
- la création de valeur environnementale en évitant la génération de déchets ultimes et la production de matière vierge.

Enfin l'émergence de solutions industrielles de recyclage des composites en France permettra la création d'emplois locaux. Le besoin de recyclage de matière composite pour d'autres secteurs utilisant des matières proche de celles des pales des éoliennes (bateau de plaisance, cabine de douche...) pourra permettre une pérennité d'approvisionnement pour ces entreprises.

Il n'y a pas de risque associé à cette opportunité.

4.1.4. Evaluation des impacts sociaux, économiques et environnementaux

Bien que le démantèlement des parcs terrestres n'ait pas encore été amorcé, le scénario de référence considéré ici est un scénario fondé sur la tendance actuelle de traitement des pales : **incinération dans les filières déjà en place en France**, qui est comparé à un scénario avec une filière de recyclage pouvant absorber les tonnages de pales sortant : **recyclage dans des filières de recyclage d'une capacité de 15 kt par an**.

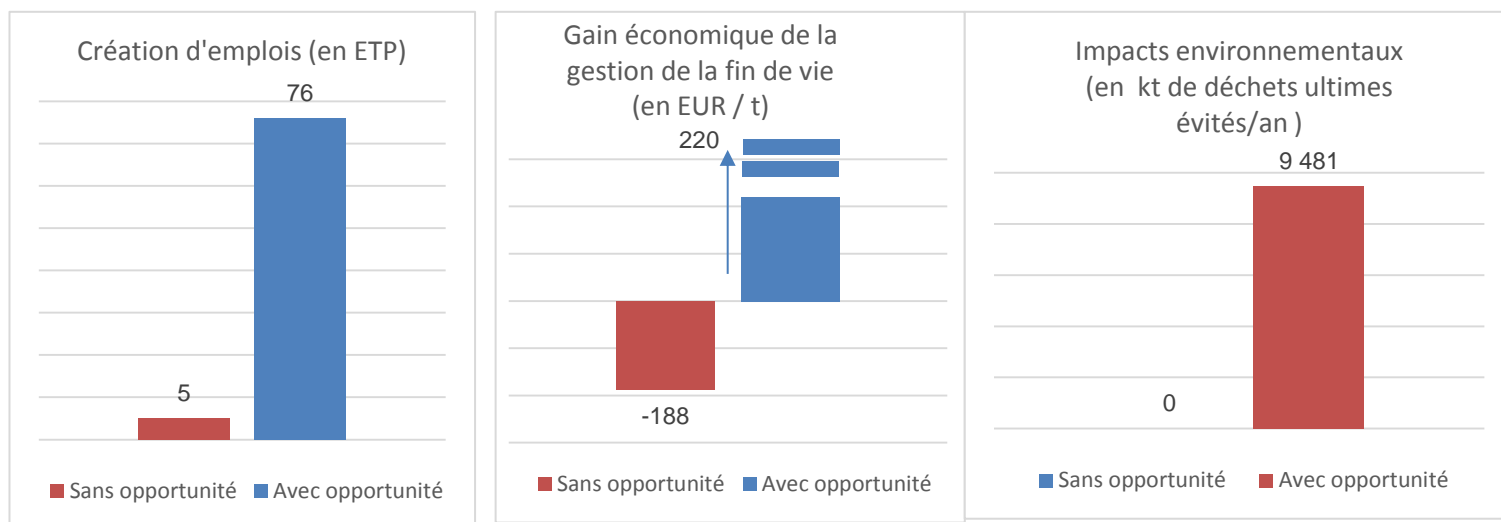


Figure 17 : Evaluation des bénéfices économiques, sociaux et environnementaux liés à l'établissement d'une filière de recyclage de pales, sous l'hypothèse d'un flux sortant de composite de 15 kt/an.

- Impacts sociaux

En considérant la mise en place d'une filière avec une capacité de traitement de 15 kt par an de matière composite à recycler, jusqu'à **75 emplois temps plein (ETP)** seraient créés.

- Impacts économiques

Contrairement aux coûts de traitement engendrés par les filières « ultimes » (incinération ou mise en décharge), les coûts associés au recyclage peuvent être compensés par la revente des matières premières secondaires. Les filières de recyclage n'étant pas encore matures pour les composites, peu de données sont exploitables. L'hypothèse faite ici est que la revente des matières premières secondaires produites compense a minima les coûts des procédés de régénération et peuvent même générer un bénéfice.

- Impacts environnementaux

Le recyclage des pales en composites engendrera des gains environnementaux sur différents aspects :

- L'évitement de la production de déchets « ultimes » et de la pollution liée aux traitements (incinération ou décharge)
- La préservation des ressources naturelles : l'utilisation de la matière régénérée en substitution à d'autres matériaux évite l'extraction de matière pour la production de ladite matière

4.1.5. Identification des freins et verrous

- Freins de marché

Non identifiés

- Verrous réglementaires

Non identifiés

- Verrous technologiques

La technologie de recyclage doit se développer pour proposer des techniques permettant d'obtenir des matériaux aux propriétés optimales pour les applications visées. L'ADEME soutient des initiatives en ce sens, avec notamment la participation à la création de l'entreprise AB Val composites qui propose une alternative pour la valorisation des déchets composites. En Europe, des groupes de travail sur ces filières existent¹⁵, on citera notamment le groupe de travail danois composé d'acteurs phares de la filière éolienne (Siemens, Vestas, LM Wind Power...) et coordonné par la Danish Wind Energy Association.

4.1.6. Pistes d'actions pour l'ADEME

- *Etudier l'impact environnemental du recyclage des pales*

L'évaluation environnementale peut se fonder sur une étude de type analyse du cycle de vie d'une solution de recyclage des pales, afin de comparer les impacts avec les solutions existantes de traitement et d'identifier les leviers d'amélioration environnementale de la mise en place d'une telle filière de recyclage.

- *Soutenir financièrement le développement d'entreprises de recyclage de composites en France*

Il s'agit de lever les freins technologiques mentionnés ci-dessus.

- *Promouvoir, soutenir et diffuser le développement de projets de partenariat académiques / industriels sur les solutions de recyclage des composites (technique de recyclage, développement de débouchés...)*

Au-delà des freins technologiques, cette action vise à favoriser la montée en puissance de la filière.

- *Intégrer dans la note environnementale des appels d'offres éoliens un critère sur la valorisation des pales*

Cette étape ne pourra être enclenchée qu'une fois que la technologie de recyclage sera considérée comme disponible.

4.2. Favoriser l'extension de la durée de vie des parcs éoliens

4.2.1. Eléments de contexte

Même si le démantèlement des parcs terrestres français ne débutera qu'à partir de 2025, les problématiques de la fin de vie se posent déjà pour un certain nombre d'acteurs, surtout pour ceux ayant des parcs éoliens dans les pays précurseurs tel que l'Allemagne.

¹⁵ <http://www.windpowermonthly.com/article/1124486/complexities-recycling-begin-bite>

La durée de vie d'un parc est fortement fonction du point de vue choisi et de ce fait, différents niveaux d'appréciation coexistent :

- La durée de vie classiquement considérée dans les études est de 20 ans.
- Pour obtenir le financement des banques, l'amortissement d'un parc doit généralement se faire sur 12 ans.
- Le dimensionnement du tarif d'achat éolien est réalisé quant à lui sur une base de 15 ans.
- La durée de vie estimée par les constructeurs avoisine davantage les 25/30 ans.

A ces différents niveaux d'appréciation se superposent différentes logiques économiques. L'exploitant pourrait choisir de démanteler son parc une fois les tarifs d'achat terminés afin d'en construire un nouveau et de bénéficier une nouvelle fois de tarifs, et ce avec des éoliennes de « nouvelle génération » potentiellement plus puissantes, mais c'est à condition qu'il réobtienne les autorisations nécessaires, ce qui pose la question de l'acceptabilité des nouveaux parcs éoliens. Il peut aussi décider de prolonger son parc le plus longtemps possible, notamment au-delà de la durée du tarif d'achat (15 ans) et de la durée de vie couramment utilisée pour les études (20 ans), et ce tant que les recettes générées dépassent les coûts d'exploitation et maintenance (qui sont croissants), comme le représente le graphique de la Figure 18.

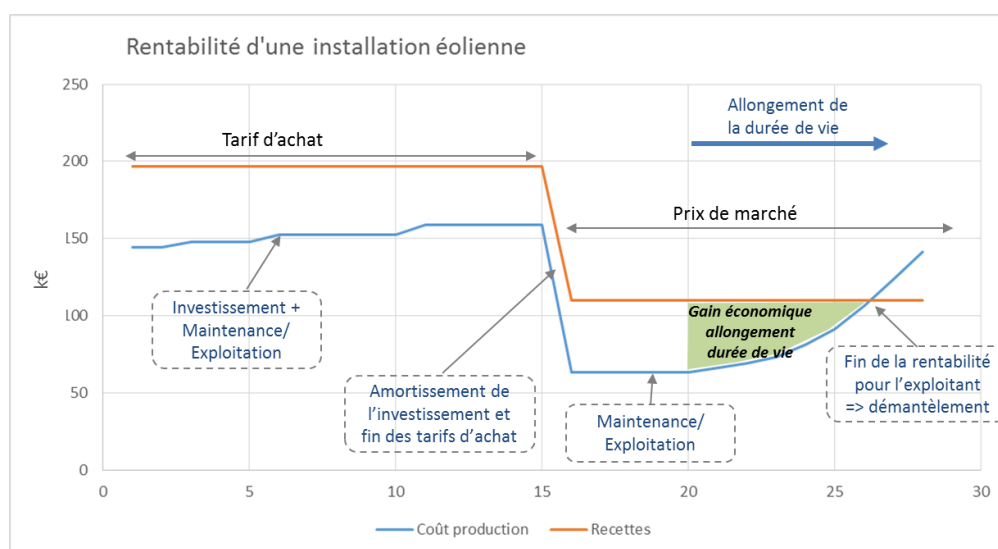


Figure 18 : Evaluation des recettes et dépenses d'une installation éolienne au cours de sa durée d'exploitation.

4.2.2. Description de l'opportunité

L'opportunité qui sera étudiée dans cette partie consiste à **favoriser l'extension de la durée de vie des parcs éoliens**, dans une logique d'optimisation économique et environnementale des actifs physiques déjà installés. On retiendra pour la suite une extension de la durée de vie de 5 ans (25 ans au lieu de 20 ans)

4.2.3. Atouts et risques de l'opportunité

Cette opportunité est celle qui permet de **répondre de la manière la plus favorable à l'enjeu « Optimiser les scénarios de fin de vie »**

Cette opportunité a un triple bénéfice : social, économique et environnemental.

Du point de vue social, l'allongement de la durée de vie des éoliennes permet de créer plus d'emplois locaux dans les services de maintenance dans la mesure où pendant ces 5 années supplémentaires, les actions de maintenance sont plus importantes.

D'un point de vue économique, il faut distinguer le point de vue de l'exploitant et celui du territoire :

- du point de vue de l'exploitant, les moindres recettes générées par une exploitation sans tarif sont à mettre en balance d'une activité « sans investissement lourd » et sans risque d'acceptabilité (à comparer avec le projet d'une nouvelle installation, plus rentable mais plus risquée) ;
- d'un point de vue du territoire, une éolienne en état de fonctionnement et financièrement amortie, représente une source d'énergie à bas coût qui vaut le coût d'être prolongée.

D'un point de vue environnemental, l'allongement de la durée de vie des parcs entraîne une réduction des flux de matière sortants et de l'ensemble des impacts environnementaux qui lui sont liés (en particulier générés par le transport et les déchets).

Les risques associés à cette opportunité sont de deux ordres :

- d'un point de vue environnemental, on peut arguer que le prolongement de la durée de vie ne permet pas d'installer des éoliennes plus puissantes ou plus productives et constitue donc un frein à l'augmentation de la production d'électricité éolienne. Ceci est à nuancer dans la mesure où d'une part le parc français est jeune et les éoliennes installées sont déjà de puissance relativement élevée, et d'autre part il n'est pas sûr que les contraintes d'acceptabilité locale permettent d'installer des éoliennes plus puissantes.
- d'un point de vue économique et social, si on raisonnait à parc éolien constant, la prolongation de la durée de vie signifierait moins d'installations neuves, soit un report partiel des ETP et de la valeur ajoutée de la phase de fabrication vers la phase de maintenance.

4.2.4. Evaluation des impacts sociaux, économiques et environnementaux

L'évaluation des impacts repose sur la comparaison entre un scénario de référence correspondant à une exploitation de parc éolien pendant 20 ans, et un scénario avec opportunité qui prend en compte une durée de vie des parcs de 25 ans suite à l'allongement de ces derniers.

Plus précisément, deux cas de figure peuvent être considérés pour la formulation des scénarios :

- Arbitrage entre l'extension de la durée de vie et l'installation de nouvelles capacités. Cela peut être le point de vue de l'exploitant qui, une fois l'exploitation de son parc terminée, va le remplacer par un nouveau parc (avec un début d'exploitation immédiat car les phases d'étude et de construction auront été anticipées). Dans ce cas de figure, le fait de ne pas allonger les parcs éoliens conduit à des volumes annuels installés plus conséquents (en moyenne 20% d'installations en plus).
- Volume fixé des nouvelles installations, arbitrage entre extension de la durée de vie ou démantèlement.

A l'échelle nationale on peut envisager des objectifs annuels d'installation de parcs éoliens (par exemple 1 000 MW/an), indépendamment de l'énergie produite par les parcs déjà installés. Dans ce cas de figure, même avec un scénario de référence qui impose une durée de vie des centrales de 20 ans, le nombre de parcs installés par an ne sera pas plus important que dans le scénario avec allongement. Ce cas se justifie par les problématiques d'acceptabilité rencontrées en France.

C'est le deuxième cas de figure qui sera retenu pour l'étude de cette opportunité. On considère que le scénario d'allongement de durée de vie des éoliennes est indépendant de la construction de nouveaux parcs. On suppose donc que les deux scénarios, avec et sans opportunité, génèrent des volumes d'installations identiques par an (fixés à 1 000 MW/an). Il s'agit bien entendu d'une hypothèse forte car cela signifie que dans le scénario avec opportunité, davantage d'énergie est produite que dans le scénario de référence.

A l'horizon 2030, la durée de vie a un effet sensible sur la capacité éolienne, comme le montre le graphique de la Figure 19 qui représente la capacité cumulée du parc éolien terrestre en France avec différentes hypothèses sur la durée de vie : i) sans démantèlement, c'est-à-dire le cumul théorique des flux entrants (installations) sans flux sortants ; ii) avec durée de vie de 20 ans ; iii) avec durée de vie de 25 ans. Sur ce graphique, la capacité totale des installations à durée de vie de 20 ans diminue après 2028 : cela est dû à la sortie des parcs installés entre 2008 et 2010, avec un pic d'installations en 2009 supérieur à 1 000 MW. Ce même effet serait visible en 2033-2035 sur les installations à durée de vie de 25 ans.

La prise en compte de la durée de vie joue donc un rôle important pour l'atteinte des objectifs de long terme.

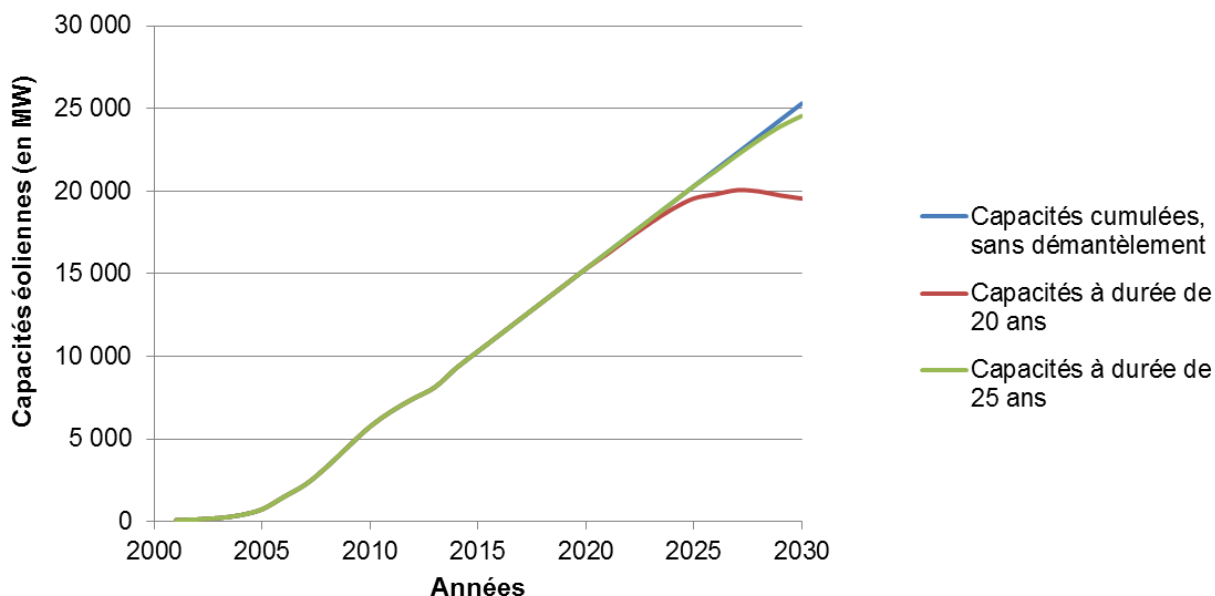


Figure 19 : Evolution des capacités à horizon 2030, suivant deux scénarios de durée de vie des parcs. Jusqu'en 2015 : installations annuelles observées. 2015-2030 : hypothèse de 1 000 MW d'installations par an.

Les différentes hypothèses prises pour les calculs d'impact sont explicitées en annexe et conduisent aux résultats illustrés en Figure 20.

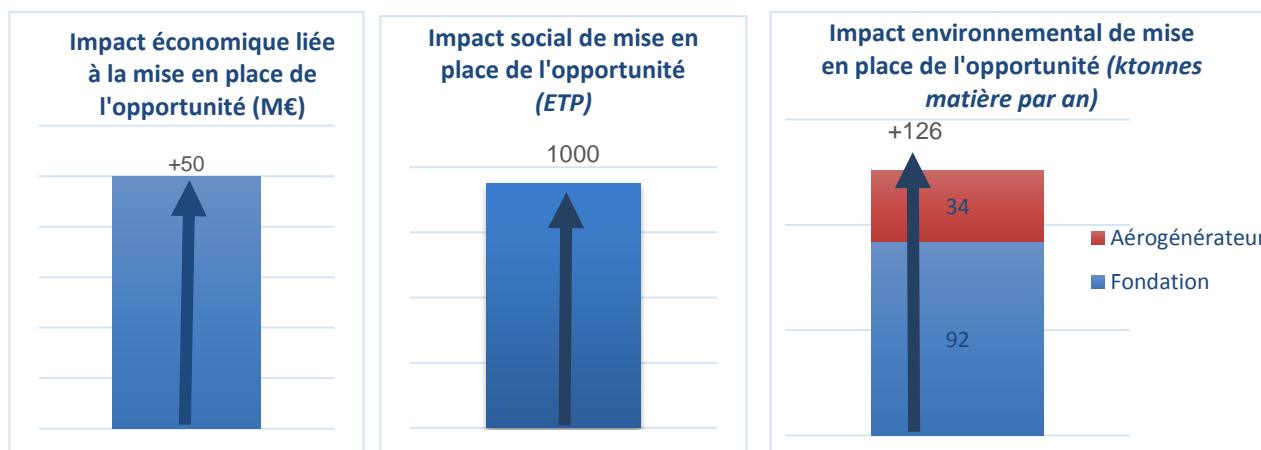


Figure 20 : Evaluation des bénéfices économiques, sociaux et environnementaux liés à l'allongement de la durée de vie de 5 ans. Bénéfices économiques et bénéfices environnementaux calculés pour une tranche de capacité éolienne de 1000 MW ; bénéfices sociaux à horizon 2030, en supposant un rythme d'installation de 1 000 MW/an après 2015.

- Impacts économiques

En pratique, pour un exploitant, la différence de rentabilité entre des scénarios avec ou sans allongement de la durée de vie dépendra de plusieurs paramètres parmi lesquels on retrouve : l'évolution du coût de maintenance¹⁶ au-delà des 20 ans d'exploitation, le niveau des tarifs d'achat (car un exploitant qui déciderait de fermer son parc éolien pour mettre en place un nouveau parc pourra de nouveau bénéficier des tarifs d'achat pendant 15 ans) ou encore le progrès réalisé sur les nouvelles générations d'éoliennes (augmentation de la performance et donc du productible). L'estimation réalisée sur la base des hypothèses présentées en annexe permettent d'évaluer le gain économique lié à l'opportunité à hauteur de 50 M€.

¹⁶ Avec un effet de moyenne qui lisse les coûts ponctuels comme le changement de pales ou encore le changement de multiplicateur.

- Impacts sociaux

L'allongement de la durée de vie des parcs permet de générer davantage d'emplois sur les activités de maintenance car avec le vieillissement du parc, l'entretien et le remplacement des pièces devront être plus fréquents. Au total, l'opportunité crée un regain d'activité de maintenance d'environ 25%. On peut observer deux contributions à l'augmentation des ETP dédiés à la maintenance, comme représenté en Figure 21 :

- L'augmentation de la durée de vie, à installations annuelles constantes, entraîne mécaniquement une augmentation des ETP liée à un parc de capacité croissante.
- Les 5 années, entre les 20 et 25 ans des parcs, demandent un surplus de maintenance, qui s'applique à la fraction du parc concerné.

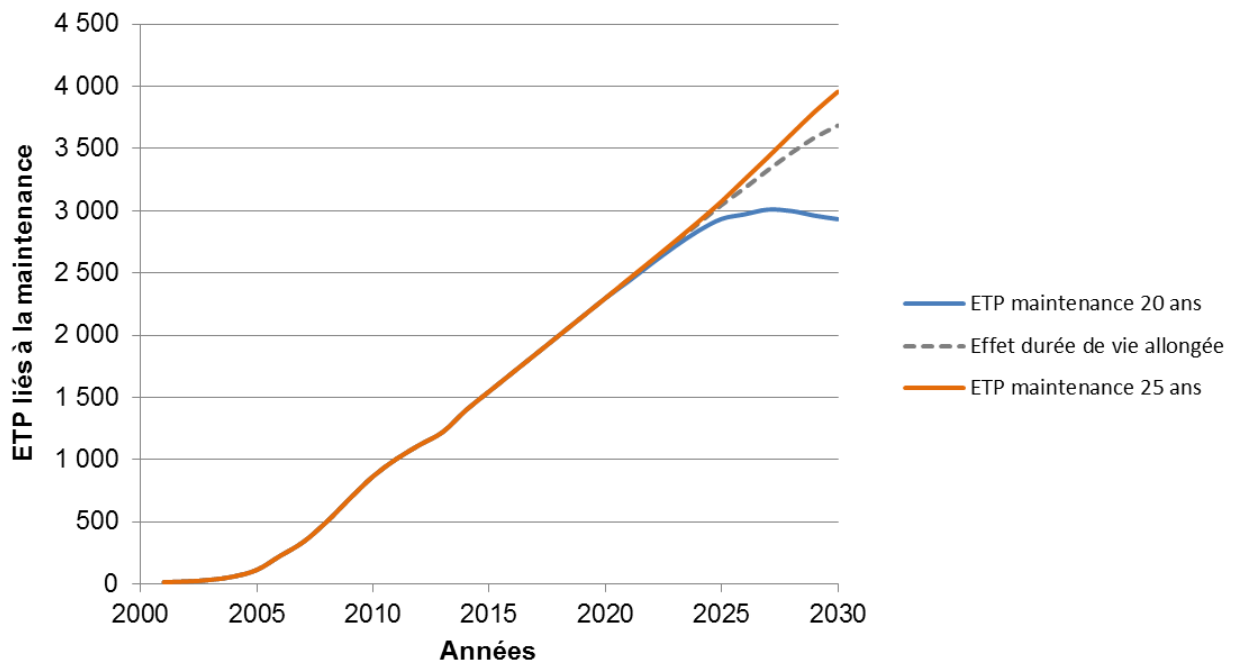


Figure 21 : Evolution des ETP dédiés à la maintenance des parcs éoliens terrestres en France (avant 2015 : installations observées ; après 2015, hypothèse d'installation de 1 000 MW/an). En bleu : durée de vie des parcs de 20 ans ; en orange : durée de vie des parcs de 25 ans ; en pointillé : contribution du seul allongement de la durée de vie.

L'augmentation d'ETP liée à la maintenance pour l'allongement de la durée de vie n'est sensible qu'après la première génération d'éoliennes du parc français, c'est-à-dire après 2025. En 2030, on peut évaluer à +1 000 ETP les emplois créés spécifiquement pour l'allongement de la durée de vie.

- Impacts environnementaux

L'allongement de la durée de vie des parcs éoliens a une forte logique au sein de l'économie circulaire car elle permet de réduire significativement les flux de matière sortants. Un allongement de 5 ans de la durée de vie de 1 000 MW d'éoliennes permettrait ainsi d'économiser des flux sortants de 126 kt de matières.

4.2.5. Identification des freins et verrous

- Freins économiques

Pas de freins identifiés.

- Freins de marché

L'extension de la durée de vie suppose de vendre la production d'électricité sur le marché (et non plus à travers les tarifs d'achat) : elle suppose ainsi une montée en compétence des exploitants et/ou le recours à des intermédiaires que sont les agrégateurs.

L'allongement de la durée d'usage implique de disposer de pièces permettant la maintenance sur des machines de plus de 15 ans et donc l'existence d'un tel marché. Ce point est développé dans l'opportunité suivante.

- Verrous réglementaires

En 2015, la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) n'impose pas de durée d'exploitation maximale pour les parcs éoliens. Par ailleurs, les enjeux de sûreté relatifs à l'exploitation d'un parc vieillissement se limitent à l'heure actuelle à des contrôles techniques tous les 5 ans. Aucun verrou réglementaire ne bloquerait donc a priori cette opportunité.

- Verrous technologiques

Pas de verrous identifiés.

4.2.6. Pistes d'action pour l'ADEME

- *Etude économique détaillée du modèle d'affaires de l'extension de la durée de vie*

Pour aller plus loin sur le potentiel de cette opportunité qui a un impact important sur la capacité globale de production éolienne, il serait intéressant de comprendre plus précisément quels segments du parc sont susceptibles d'être prolongés, et si au-delà des 5 ans mentionnés plus hauts, une extension plus importante est envisageable.

- *Etude de la performance environnementale comparée de l'extension de la durée de vie et du repowering.* Une comparaison plus détaillée entre *repowering* et allongement de la durée de vie des parcs pourrait être réalisée afin d'évaluer de manière plus précise la différence d'impact environnemental, et notamment la possibilité de conserver des éléments significatifs de l'éolienne dans le cas du *repowering*.

4.3. Favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de reconditionnement et de maintenance

4.3.1. Eléments de contexte

Au-delà de la maintenance de 1^{er} niveau, la maintenance plus lourde et le reconditionnement sont des postes qui ne peuvent être négligés au cours de l'exploitation d'un parc éolien car le bon vieillissement de ce dernier en dépendra. A elle seule, la maintenance représente plus de 20% du coût total d'un parc éolien.

A l'heure actuelle, la majorité de la maintenance est effectuée par les grands constructeurs éoliens qui mettent en place des contrats avec l'exploitant dès la livraison et la mise en place des équipements. Ainsi, l'ensemblier Enercon propose par exemple le contrat EPK (Enercon PartnerKonzept) qui assure au client une haute garantie sur les machines pendant les 15 premières années d'exploitation. Le constructeur prend alors à sa charge la totalité des coûts de maintenance, maintien en état et réparations hormis parfois les coûts de transport et de levage.

Si certains constructeurs étrangers préfèrent faire appel à des techniciens locaux via leur filiale française (pour éviter des frais de transport de main d'œuvre et des délais d'intervention trop importants), d'autres envoient leurs techniciens dans le pays.

Les exploitants sont donc encore assez peu en charge de la maintenance de leurs propres parcs même si de plus en plus d'acteurs, à l'instar de Maïa Eolis, aimeraient désormais gérer ces activités en interne. Quelques entreprises indépendantes, comme ALMEA, proposent également des services de maintenance préventive et/ou curative.

4.3.2. Description de l'opportunité

L'opportunité qui sera étudiée dans cette partie consiste à **favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de reconditionnement et de maintenance**. En d'autres termes, il s'agit de privilégier la prise en charge de ces activités de maintenance et reconditionnement par des acteurs

français, exploitants ou PME, plutôt que par des constructeurs. Cette opportunité s'accompagne de la dynamisation d'un marché de pièces détachées plus indépendant des grands constructeurs.

4.3.3. Atouts et risques de l'opportunité

Cette opportunité présente un **double atout** :

- Sur la dimension « produit », des acteurs locaux de reconditionnement permettraient d'augmenter la part des pièces reconditionnées par rapport aux pièces neuves, pour des raisons a priori de compétitivité prix et d'absence de conflit stratégique entre pièces neuves et pièces reconditionnées.
- Sur la dimension territoriale, le rapatriement sur le territoire français de cette partie de la chaîne de valeur de la filière éolienne est générateur de bénéfices économiques et sociaux évidents, mais aussi de bénéfices environnementaux en limitant les déplacements.

En ce qui concerne les risques, la mise en place des activités de maintenance et de reconditionnement par des prestataires locaux, c'est-à-dire en-dehors du cercle du constructeur, pourrait entraîner une baisse dans la qualité des prestations et par conséquent un risque pour le bon vieillissement des parcs. En effet, ces prestataires n'ont a priori ni le savoir-faire technique du constructeur, ni les équipements nécessaires au reconditionnement de pièces technologiques telles que les paliers multiplicateurs. Ainsi, pour que cela soit évité, il est nécessaire que les prestataires montent en compétence afin d'égaliser le savoir-faire acquis par les constructeurs au cours du temps.

4.3.4. Evaluation des impacts sociaux, économiques et environnementaux

L'analyse des impacts nous amène à considérer un scénario de référence qui continue la tendance actuelle avec une maintenance réalisée quasi-exclusivement par les grands constructeurs, et un scénario avec opportunité qui considère qu'une part relativement importante de l'activité de maintenance et reconditionnement peut être réalisée par des prestataires locaux (PME ou exploitants).

La maintenance peut se décomposer en trois niveaux :

1. **préventive** : aucun problème technique n'est constaté mais un entretien basique des équipements est réalisé, via notamment l'utilisation de consommables (lubrifiant). Cette maintenance est réalisée chaque année tout au long de la durée de vie du parc et principalement par des acteurs locaux ;
2. **curative** : un problème a été constaté et des techniciens spécialisés doivent aller sur le terrain pour intervenir et réparer l'incident. Les interventions en curatif sont plus parsemées dans le temps et peuvent être déclenchées via des signaux transmis par des capteurs et des logiciels embarqués. Du fait du degré de spécialisation, les opérateurs peuvent ne pas être présents sur le territoire français et venir donc des pays limitrophes (Allemagne, Danemark) ;
3. « **de remplacement** » : suite au défaut d'une des pièces composant l'éolienne, un remplacement de la pièce est effectué. La pièce défectueuse pourra ensuite, selon les cas, être reconditionnée. Actuellement, les pièces sont majoritairement renvoyées aux constructeurs qui peuvent être amenés à les remplacer sans les reconditionner. Ces interventions en remplacement sont beaucoup plus rares mais en même temps beaucoup plus coûteuses, dû au coût des équipements à remplacer (paliers multiplicateur, pales, ...).

On supposera pour la suite que ces trois niveaux de maintenance concentrent respectivement 40%, 30% et 30% de la valeur en euros et en emplois.

Chacune de ces activités de maintenance n'entraîne pas de la valeur et des emplois locaux dans les mêmes proportions. Des hypothèses jugées probables ont été prises pour chacun des scénarios (avec ou sans opportunité) et ont été regroupées dans le Tableau 6.

Différents niveaux de maintenance		Localisation		Type d'entreprise		Taux de reconditionnement		
		Français	Etranger	Entreprise indépendante	Filiale constructeur	Reconditionné	Non reconditionné	
		1	Maintenance préventive 40%	Scénario de référence	100%	0%	50%	50%
		Scénario avec opportunité	100%	0%	80%	20%		
2	Maintenance curative (experte) 30%	Scénario de référence	50%	50%	20%	80%		
		Scénario avec opportunité	80%	20%	50%	50%		
3	Changement de pièces 30%	Scénario de référence	10%	90%	10%	90%	50%	50%
		Scénario avec opportunité	50%	50%	50%	50%	80%	20%

Tableau 6 : Hypothèses de répartition de la maintenance, dans le scénario de référence et dans le scénario avec opportunité

Les hypothèses supplémentaires retenues pour la construction de cette étude d'impact sont exposées en annexe 4. Les résultats sont représentés en Figure 22.

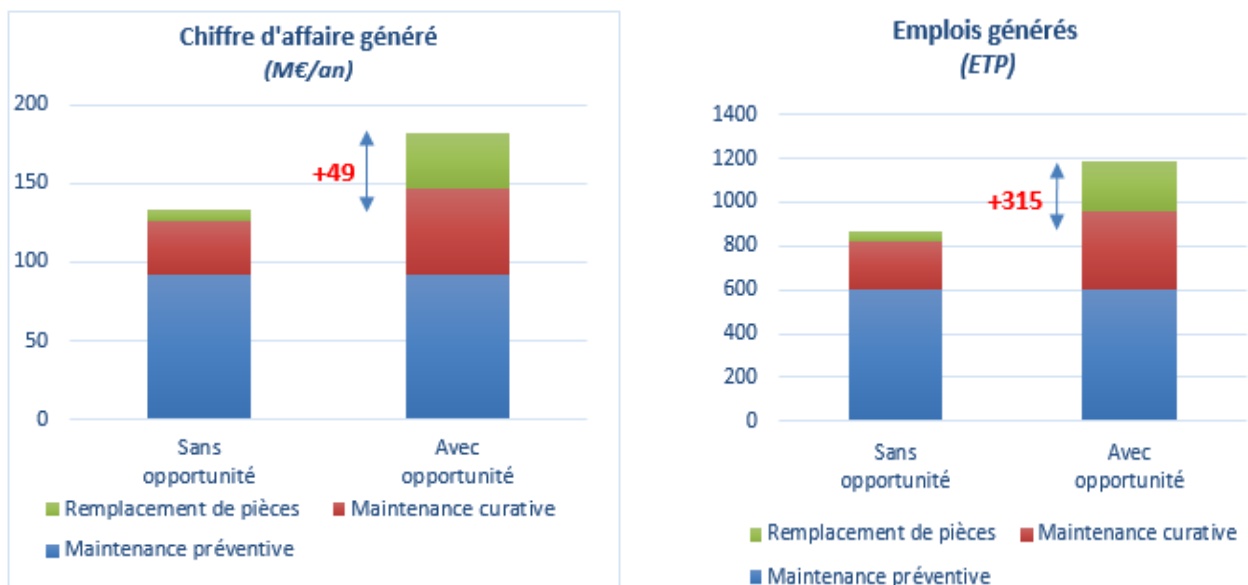


Figure 22 : Evaluation des bénéfices économiques et sociaux liés à la montée en compétence des prestataires locaux pour les services de reconditionnement et de maintenance, pour une capacité éolienne de 10 000 MW.

- Impacts économiques

La montée en compétence de prestataires locaux pour les services de maintenance et de reconditionnement permet, pour une capacité éolienne de 10 000 MW, de générer une valeur économique à hauteur de 49 M€/an, valeur qui est pour le moment captée majoritairement par les grands constructeurs étrangers.

- Impacts sociaux

Sur le plan social, les services de maintenance génèrent déjà des emplois locaux via les filiales françaises des ensembliers mais davantage d'emplois de maintenance et de reconditionnement, environ 315 équivalent temps plein, pourraient être créés grâce au transfert des compétences de maintenance et reconditionnement à un tissu de PME locales ou d'exploitants.

- Impacts environnementaux

Les principaux gains environnementaux, quoique difficilement quantifiables, sont en grande partie dus au reconditionnement pouvant être réalisé sur les éléments constituant l'éolienne (palier multiplicateur, génératrice, ...). Ce reconditionnement, effectué localement, permet non seulement d'éviter la fabrication d'une nouvelle pièce (et donc les flux de matière première et les émissions de gaz à effet de serre associées) mais également d'éviter le transport de ces pièces à reconditionner jusqu'au constructeur (principalement en Allemagne ou au Danemark).

4.3.5. Identification des freins et verrous

- Freins économiques

Le maintien d'un marché des pièces détachées sur des anciens modèles peut avoir un coût pour les turbiniers qui renouvèlent souvent leurs gammes.

- Freins de marché

L'accès aux pièces détachées est un élément clé pour la réussite d'entreprises de maintenance et de conditionnement. Pour un exploitant ou une PME locale spécialisée dans la maintenance des éoliennes, il est très difficile d'accéder au marché des pièces détachées qui est un marché jalousement gardé par les turbiniers. Il est nécessaire de négocier et mettre en place un contrat spécifique pour accéder aux pièces nécessaires à l'entretien.

- Verrous réglementaires

Un référencement auprès des constructeurs européens est nécessaire pour que des échanges de pièces et d'informations techniques puissent se faire. Ce processus, qui prend environ un an, peut facilement décourager les petites PME locales voulant créer une activité de maintenance.

- Verrous technologiques

Chaque type d'éolienne a son fonctionnement propre et ses règles de maintenance ce qui rend compliqué, pour un acteur autre que le constructeur, de monter en compétence et de réaliser la maintenance sur plusieurs modèles en parallèle. Ainsi, les exploitants français ayant décidé de s'occuper de la maintenance se focalisent souvent sur un seul type de modèle d'éolienne auprès d'un fournisseur exclusif.

4.3.6. Pistes d'action pour l'ADEME

- *Etude des compétences disponibles et des compétences nécessaires pour favoriser cette filière française*

Il est indispensable de cartographier l'existant (entreprises actuelles, réseau de compétences, ...) et d'évaluer l'écart avec les compétences et savoir-faire nécessaires à l'essor de la filière.

- *Mise en place de programmes de formation pour les prestataires locaux indépendants*

La montée en compétence des prestataires français est a priori clé pour permettre de réaliser les prestations de maintenance à plus forte valeur ajoutée.

- *Mise en place de conditions favorables dans les appels d'offres*

Demander à travers les appels d'offres pour l'éolien (au niveau de l'Etat) des conditions liées au reconditionnement ainsi qu'à la possibilité de maintenance « ouverte »

4.4. Pérenniser les plateformes de fabrication des éoliennes maritimes avec le démantèlement des parcs terrestres

4.4.1. Eléments de contexte

- Plateformes pour les éoliennes en mer

Deux appels d'offres pour l'éolien en mer ont été lancés par l'Etat pour la construction de 6 parcs en mer, pour une puissance totale de 3 000 MW d'ici à 2020 et permettant de mobiliser près de 10 000 emplois. La

création d'emplois locaux étant une condition du cahier des charges des appels d'offres de l'éolien en mer, ces projets ont permis la création d'emplois industriels directs dans les régions des Pays de la Loire, en Bretagne, en Basse et Haute Normandie :

- 2 usines à St-Nazaire (fabrication des génératrices et nacelles)
- 2 usines à Cherbourg (fabrication de pales et mâts)

D'autres usines pour la fabrication et l'assemblage sont prévues autour de St-Nazaire, Brest, Cherbourg et le Havre (Figure 23). Le deuxième appel d'offres a permis le projet de construction de 6 usines réparties entre Le Havre et Dunkerque.

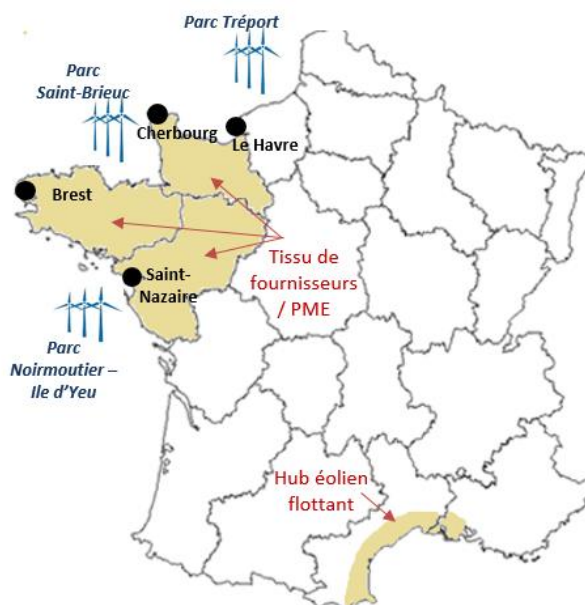


Figure 23 : Dispositif industriel mis en place pour les 2 appels d'offres pour l'éolien en mer

Ce dispositif constitue un outil industriel puissant, **générateur de valeur économique et d'emplois locaux sur les territoires d'implantation**. L'enjeu pour la filière sera de pérenniser ces plateformes en lissant la charge ou en maintenant leur activité une fois la construction des parcs en mer achevée.

- Démantèlement des éoliennes

Le démantèlement d'une éolienne se réalise en plusieurs temps :

- Le **démontage** des gros ensembles
Cette étape se fait sur site à l'aide de grues de très grande capacité et permettra le démontage du rotor et des pales, de la nacelle et de la tour.
- Le **désassemblage** des constituants
Une fois les gros ensembles démantelés, ils sont acheminés vers des centres de traitements et sont désassemblés pour récupérer les différents constituants.
- Le **traitement** des composants
Dans les centres de traitement, chaque composant est traité pour une réutilisation ou dépollué et trié pour satisfaire aux exigences des filières de recyclage existantes.

Etant donné le caractère récent du parc français, l'activité de démantèlement n'a pas encore démarré en France. En 2020/2025, la construction des parcs en mer des appels d'offres sera en cours de finalisation alors que les besoins de démantèlement seront en plein essor, comme illustré dans la Figure 24.

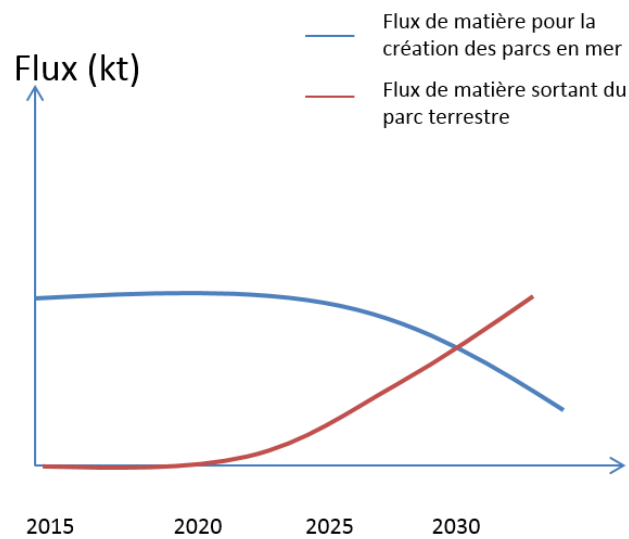


Figure 24 : Schématisation des flux de matière de l'éolien

4.4.2. Description de l'opportunité

Plutôt que de voir, d'une part le dispositif industriel maritime risquer de disparaître en raison de la baisse du marché domestique de l'éolien en mer, et d'autre part le démantèlement du parc terrestre s'opérer de manière désordonnée et potentiellement en ayant recours aux filières déjà structurées comme les filières du Nord de l'Europe, l'opportunité décrite ici consiste à **utiliser le savoir-faire et les installations industrielles développées pour l'éolien en mer, afin de gérer le démantèlement des parcs éoliens terrestres en France.**

Sont considérées ici toutes les étapes du démantèlement hors démontage sur site : désassemblage des constituants et traitement des composants. Ces réalisations requièrent des compétences communes aux étapes de fabrication des éoliennes, et notamment des compétences en :

- Assemblage / désassemblage de nacelles
- Assemblage / désassemblage de génératrices
- Soudage / dessoudage des différents composants
- Broyage des matières composites des pales

De plus les installations développées pour l'éolien en mer étant dimensionnées pour des gros volumes, les ateliers pourront parfaitement accueillir et stocker les ensembles démontés de gros gabarits.

4.4.3. Atouts et risques de l'opportunité

Le traitement des parcs terrestres via les installations développées pour les appels d'offres pour l'éolien en mer permettra de créer de véritables **éco-systèmes industriels locaux**, faisant un pont entre l'industrie de l'éolien en mer et terrestre et permettant de pérenniser les outils industriels et les emplois en cours de construction.

En ce qui concerne les risques, la constitution d'un écosystème unique localisé sur le littoral Ouest de la France risque de dévitaliser les écosystèmes secondaires actuellement répartis dans différents territoires en France.

4.4.4. Evaluation des impacts sociaux, économiques et environnementaux

En l'absence de mise en place de l'opportunité décrite ici, 2 scénarios parallèles de démantèlement des parcs terrestres se mettront certainement en place :

- un scénario de désassemblage / traitement **de manière diffuse sur le territoire français**, qui se fera en fonction des compétences disponibles sur le territoire ;

- un scénario de désassemblage / traitement **vers les centres de compétence européens** (Danemark, Allemagne...).

Impacts sociaux

- Intégration de la compétence « traitement en fin de vie » pour maintenir l'activité des plateformes en mer et pérenniser les emplois

Impacts économiques

- Coûts de transport limités dans le cas d'un traitement en France

Impacts environnementaux

- Coûts environnementaux du transport limités
- Réinjection sur le marché français facilitée des composants en fin de vie (recyclage / réutilisation)

- Impacts sociaux

Une fois les parcs éoliens en mer des premiers appels d'offres pleinement équipés, un risque pèsera sur la pérennisation des 10 000 emplois créés sur les plateformes de fabrication (en cas de diminution du rythme d'installation d'éoliennes en mer ou d'appel à d'autres fabricants). Bien que des activités à l'export soient envisagées par les constructeurs, l'intégration de la compétence « traitement en fin de vie » des éoliennes terrestres viendrait maintenir l'activité de ces plateformes et pérenniser les emplois.

Par ailleurs, la centralisation et l'identification d'une plateforme de compétence pour le désassemblage / traitement des éoliennes terrestres permettrait de conserver cette activité encrée dans le territoire.

- Impacts économiques

Dans le cas où le désassemblage / traitement se ferait de manière diffuse sur le territoire français, l'existence d'une plateforme dédiée ne constituerait pas forcément un avantage économique significatif : les gains de productivité d'une installation spécialisée pouvant être compensés par des coûts de transport.

En revanche, dans le cas d'un désassemblage / traitement hors France, les coûts du transport des gros volumes viendraient alourdir la facture par rapport aux coûts de traitement local dans les plateformes françaises.

- Impacts environnementaux

Un démantèlement local dans une plateforme identifiée permettra de limiter les coûts environnementaux du transport. Par ailleurs, la centralisation des composants et des matières en fin de vie, que ce soit en vue de la réutilisation ou du recyclage, permettra une réinjection plus facile dans le marché français (marché des pièces détachées, approvisionnement des filières de recyclage françaises...) dans une logique circulaire et locale.

NB : Les usines pour la fabrication des parcs en mer étant en cours de construction et le démantèlement des parcs éoliens terrestres étant prévu de débuter dans une dizaine d'année, peu de données sont exploitables et ne nous permettent pas d'établir des scénarios chiffrés.

4.4.5. Identification des freins et verrous

- Freins économiques

La viabilité économique d'un démantèlement poussé qui utiliserait le savoir-faire de la construction maritime (comparé à un démantèlement basique considérant une vente des matériaux sur le marché de gros) n'est pas forcément évidente.

- Freins de marché

Suivant l'évolution des cadences d'installation de l'éolien en mer, il peut y avoir un risque de chevauchement dans le temps avec le développement du démantèlement de l'éolien terrestre qui pourrait venir freiner la mutualisation du développement de ces 2 filières.

Par ailleurs, l'acceptation de la mutualisation des infrastructures peut se heurter à la diversité des acteurs de l'éolien terrestre et de l'éolien en mer.

- Verrous réglementaires

Non identifiés

- Verrous technologiques

Les techniques de fabrication et de démantèlement peuvent être très différentes : intensité de la main d'œuvre, spécificité des métiers...

Les machines et leurs constituants peuvent être très différents entre l'éolien en mer et l'éolien terrestre.

4.4.6. Pistes d'action pour l'ADEME

- *Etudes de l'économie et des débouchés d'une filière de démantèlement*

Au-delà du modèle économique de recyclage des pales, il est utile d'étudier en détail l'économie et les débouchés d'un démantèlement plus ou moins poussé, afin de déterminer la valeur ajoutée qui pourrait être localisée en France en fin de vie.

- *Analyse comparée des savoir-faire à mobiliser pour le démantèlement et pour la construction d'éoliennes en mer*

Une fois l'étude économique réalisée qui permet de délimiter un périmètre raisonnable pour l'activité de démantèlement, il est utile d'évaluer les synergies réelles entre les 2 activités, en se fondant sur une analyse de chaque étape de la construction et du démantèlement.

4.5. Augmenter la capacité de fabrication des tours en France pour favoriser les achats locaux

4.5.1. Eléments de contexte

Depuis 2013, FrancEole, avec ses deux usines réparties entre Dijon et le Creusot, est l'unique fabricant indépendant de mâts en acier en France. Avec une capacité maximale de production d'environ 200 mâts/an en 2014, FrancEole a contribué à la fourniture d'environ 40% des mâts en acier installés en France. Pour les tours en béton, seul le constructeur allemand Enercon, avec son usine de Compiègne est présent sur le territoire français, mais ces tours sont exclusivement construites pour les éoliennes Enercon.

Les tours en acier demeurent moins chères que celles en béton mais restent très dépendantes du cours mondial de l'acier, d'où le choix pour certains constructeurs, comme Enercon, de privilégier le béton. En pratique, les mâts en béton n'équipent qu'environ 10% du parc éolien français et restent donc relativement à la marge, même si des projets innovants tels que le projet Eolift (issu de l'Appel à Manifestations d'Intérêt pour le Grand Eolien, programme des investissements d'avenir) pourront contribuer à la promotion de l'usage béton pour les futurs parcs éoliens français.

Dans la chaîne d'approvisionnement, les tours représentent une part importante du flux entrant (environ 60-70% de la masse de la turbine) et sont par ailleurs les éléments qui se prêtent le plus à une localisation rapprochée, en raison d'une part des difficultés et des coûts de transport sur longue distance, et d'autre part de sa faible spécificité technologique (facilement adaptable à différents modèles d'éoliennes).

4.5.2. Description de l'opportunité

L'opportunité consiste à **accroître la capacité de fabrications de tours françaises** : la part de marché des tours françaises étant actuellement en partie limitée par l'offre¹⁷, il est envisageable de doubler la part de marché des tours françaises (de 40% à 80%), soit en consolidant l'acteur actuel, soit en contribuant à faire émerger un nouvel acteur, que ce soit sur la technologie acier ou la technologie béton.

¹⁷ Entretien réalisés avec des constructeurs et exploitants de la filière éolienne française. NB : Le fabricant actuel de tours souhaite investir en hommes et en machines afin de pouvoir continuer à répondre aux commandes.

4.5.3. Atouts et risques de l'opportunité

En raison du poids majoritaire de la tour, l'augmentation de la localisation des tours permet de **contribuer de façon majeure à l'enjeu d'Economie Circulaire « Optimisation des flux logistiques et de services »**.

L'augmentation de la capacité de fabrication de mâts d'éoliennes par des acteurs français représente un gain conséquent pour le territoire, aussi bien en termes économiques avec une valeur qui sera créée localement et redistribuée sur le territoire, qu'en termes sociaux avec la création d'emplois industriels pérennes et de tissus de PME locales spécialisées dans les métiers de soudure et de pliage.

Rapportés à la filière française de l'éolien, les éventuels coûts de fabrication plus importants (liés à un manque de maturité et d'unités industrielles opérationnelles, par rapport aux concurrents) seront contrebalancés par les frais évités en transport, ce qui ne devrait donc pas générer de surcoûts pour l'ensemble de la filière.

Sur le plan environnemental, la consolidation d'acteurs locaux pour la construction des mâts réduira davantage encore les kilomètres parcourus par les mâts et donc l'empreinte carbone des tours.

Le risque de cette opportunité est lié au retour sur investissement de la capacité de production, en raison de la fluctuation des volumes annuels d'installation (entre 600 MW et 1 300 GW).

4.5.4. Etude de l'impact social, économique et environnemental

Afin d'évaluer l'impact qu'aurait la mise en place de l'opportunité au sein du territoire, on compare un scénario de référence correspondant au marché actuel (sans augmentation de la part de marché des acteurs français) à un scénario avec mise en place de l'opportunité.

Cette étude de cas a été réalisée sur les mâts en acier car ils sont les plus représentatifs du parc français. Toutefois, si les avantages liés à l'utilisation du béton plutôt que de l'acier existent, la comparaison entre les deux matériaux nécessiterait une étude à part entière afin de dégager de façon pertinente les différences d'impacts (économiques et environnementaux) entre l'acier et le béton.

Le scénario de référence, fondé sur l'horizon 2014 avec des données croisées de 2013 et 2014¹⁸, est construit en suivant les hypothèses présentes en annexe 2.

L'impact économique, social et environnemental associé à l'opportunité est représenté en Figure 25.

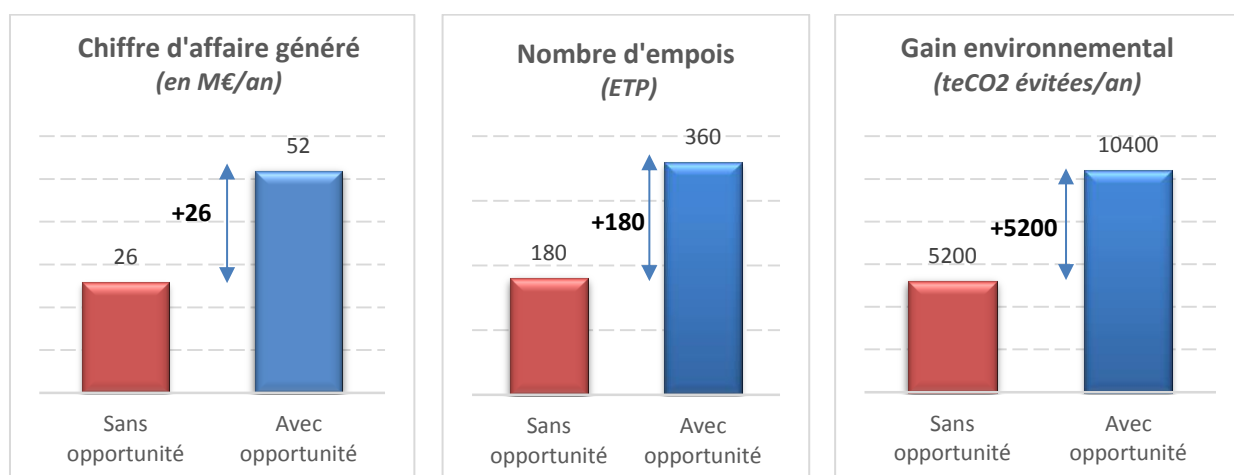


Figure 25 : Evaluation des bénéfices économiques, sociaux et environnementaux liés à l'accroissement de la capacité de fabrications de tours françaises, pour un marché annuel de 1 000 MW de nouvelles installations.

¹⁸ Sources : Entretien acteurs de l'éolien, site FrancEole, presse Saône-et-Loire et Usine Nouvelle, CEFIC

- Impacts économiques

Sur le plan économique, l'émergence d'un fabricant de tours français permettrait de générer de la valeur sur le territoire à hauteur de 26 M€ supplémentaires, à comparer au marché intérieur des équipements éoliens qui avoisine les 800 M€ en prévision pour l'année 2014¹⁹.

- Impacts sociaux

En termes d'emplois, l'émergence d'un fabricant de mâts pourrait permettre la création d'environ 180 emplois supplémentaires (ETP).

- Impacts environnementaux

Sur le plan environnemental, l'opportunité n'entraîne pas ou peu d'impact sur les ressources. Seule une économie sur le transport des segments des mâts à destination des parcs éoliens français permettrait de réduire l'impact carbone à hauteur de 5200 téqCO₂/an par rapport au scénario de référence qui présente déjà des économies carbone liées au 40% de part de marché détenues par un fabricant local et non par un constructeur européen étranger.

4.5.5. Identification des freins et verrous

- Freins économiques

Non identifiés

- Freins de marché

Le frein principal à la réalisation de cette opportunité est dû au manque de visibilité sur l'évolution de la filière française de l'éolien. En effet, les fabricants de mâts français sont tributaires des commandes passées par les grands constructeurs qui sont eux-mêmes dépendants, pour la construction de leurs parcs en France, des tarifs d'achats et des volumes ciblés par l'Etat français. De plus, le marché des tours étant un marché très local, dû aux contraintes sur le transport, il est difficile pour un fabricant de mâts d'étendre son portefeuille-client au-delà de la France et des quelques pays limitrophes. La possibilité de foisonner ses ventes pour compenser le manque de visibilité sera donc très limitée, à l'inverse des grands constructeurs.

- Verrous réglementaires

Non identifiés

- Verrous technologiques

Si les technologies d'acier terrestre sont relativement matures, des acteurs travaillent aujourd'hui à des nouveaux procédés de tours béton qui permettraient de les rendre plus compétitives.

4.5.6. Pistes d'action pour l'ADEME

- *Soutien aux technologies innovantes de tours*

Les pouvoirs publics doivent continuer à soutenir des projets et technologies françaises innovantes permettant de renforcer la compétitivité des acteurs français.

- *Etudier l'impact environnemental comparé des tours acier et béton*

L'évaluation environnementale peut se fonder sur une analyse du cycle de vie comparative des tours aciers et béton.

¹⁹ Etude ADEME 2014 sur les Marchés et Emplois liés à l'efficacité énergétique et aux EnR

4.6. Faire émerger un grand ensemble français pour optimiser la chaîne de valeur et les flux

4.6.1. Eléments de contexte

Pendant plusieurs années, la France ne comptait qu'un seul ensemble d'éoliennes, Vergnet²⁰, spécialisé dans les éoliennes de moyenne puissance, hautement résistantes face aux aléas climatiques. Il occupe un marché assez restreint, tourné principalement vers le Pacifique et l'Afrique. Plus récemment, Areva et Alstom, historiquement présents sur le composant majeur qu'est la turbine, sont devenus ensembles éoliens sur le segment maritime, et ont répondu aux deux appels d'offres sur l'éolien en mer (chacun ayant remporté un ou plusieurs parcs). Enfin, en 2015 la société Poma a développé une activité d'assemblage des éoliennes Leitwind.

Globalement, la France n'est donc toujours que faiblement représentée dans le cercle restreint des grands constructeurs éoliens terrestres alors que ce marché est de loin celui qui fait les plus gros volumes, en France comme dans le monde. A eux seuls, les constructeurs allemands Enercon, Senvion et Nordex se partagent 56% de la puissance éolienne cumulée installée en France, et les constructeurs Vestas (Danemark) et Gamesa (Espagne) se répartissent 30%. A noter que Vergnet n'a quant à lui fourni que 1% de la puissance installée en France.

4.6.2. Description de l'opportunité

L'opportunité consiste à contribuer à **faire émerger un grand ensemble français** qui entrera en concurrence avec les autres grands constructeurs des pays voisins et visera à occuper une part non négligeable (ex : 30%) du marché national de l'éolien « terrestre », ainsi qu'une part du marché export. Cet ensemble serait intégré sur les composants nacelle et rotor comme la plupart des grands constructeurs. Ce grand ensemble français pourrait émerger à partir des acteurs déjà présents sur la chaîne de valeur de l'éolien et devrait notamment proposer une éolienne dont les caractéristiques sont adaptées au marché français.

4.6.3. Atouts et risques de l'opportunité

Le positionnement en tant qu'ensemble est clé pour l'économie circulaire dans la mesure où l'ensemble, tête de file de la chaîne de valeur, détient la plupart des leviers de l'économie circulaire (écoconception, recyclage, ...) permettant de minimiser l'impact environnemental et de maximiser les emplois locaux, que ce soit en direct ou à travers le choix de ses sous-traitants. Cette opportunité permet donc de **contribuer de manière majeure à différents enjeux de l'économie circulaire : Optimisation des flux logistiques, Amélioration de l'efficacité matière et de la recyclabilité, Ecologie Industrielle et Territoriale**

Le positionnement d'ensemble intégré (en dehors des mâts et des fondations) concentre la majorité de la valeur économique d'une nouvelle capacité éolienne. En conséquence, localiser sur le territoire français un ensemble intégré entraîne de fortes retombées économiques et sociales.

L'émergence d'un ensemble français peut générer une valeur environnementale grâce aux économies de transport des éoliennes (sous l'hypothèse que les fournisseurs de rang 1 soient également implantés sur le territoire français) mais aussi grâce à la vision transversale sur l'ensemble du cycle de vie des machines.

Enfin, d'un point de vue général, l'émergence d'un grand turbinier français permettrait de davantage structurer la filière éolienne.

En ce qui concerne les risques, cette opportunité pourrait renforcer la surcapacité européenne et donc compliquer la viabilité financière de ce nouvel acteur qui serait très dépendant du soutien de l'Etat.

²⁰ L'ensemble français Jeumont ayant arrêté définitivement son activité en 2005

4.6.4. Evaluation des impacts sociaux, économiques et environnementaux

L'évaluation de l'impact associé à l'opportunité retenue consiste à comparer un scénario de référence correspondant au marché actuel (sans grand ensemble français) à un scénario avec mise en place de l'opportunité. Ce scénario de référence est construit en suivant les hypothèses présentées en annexe 1. Le scénario avec opportunité tient compte de l'émergence d'un ensemble français qui viendrait prendre 30% de part de marché et qui maîtriserait, soit directement ou soit par le biais d'un tissu d'entreprises locales, la fabrication des composants nacelle et rotor (en plus de l'assemblage).

L'impact économique, social et environnemental associé à l'opportunité est représenté en Figure 26.

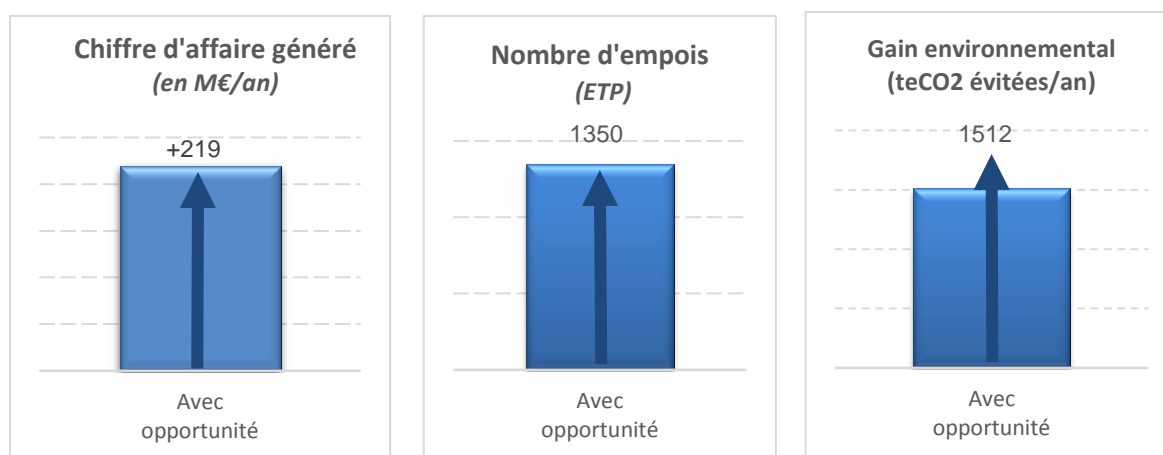


Figure 26 : Evaluation des bénéfices économiques, sociaux et environnementaux liés à l'émergence d'un grand ensemble français captant un marché annuel de 300 MW de nouvelles installations.

- Impacts économiques

Sur le plan économique, l'émergence d'un ensemble français permettrait de **générer de la valeur sur le territoire à hauteur de 220 M€** supplémentaires, correspondant à une part de marché de 300 MW annuels.

Par ailleurs, un grand ensemble français permettrait la **polarisation de la chaîne R&D** et impulserait la **simplification du référencement des sous-traitants français**.

- Impacts sociaux

En termes d'emplois, la construction des 300 MW annuels d'éoliennes terrestres correspondrait à la création d'environ **1350 emplois directs supplémentaires** (ETP).

- Impacts environnementaux

Sur le plan environnemental, l'opportunité n'entraîne pas ou peu d'impact sur les ressources. Toutefois, une économie sur le transport des composants des nacelles et rotors à destination des parcs éoliens français permettrait de **réduire l'impact carbone à hauteur de 1500 t éqCO₂/an**.

4.6.5. Identification des freins et verrous

- Freins économiques

L'investissement dans une nouvelle usine de production et d'assemblage, au sein d'un système productif européen globalement déjà saturé, représente un surcoût qu'il sera difficile à absorber dans la compétition économique face aux acteurs déjà présents. Ce frein économique pourrait être levé partiellement si ce nouvel ensemble français mettait sur le marché une éolienne plus adaptée aux spécificités du marché français (puissance, technologie) que les modèles des concurrents.

- Freins de marché

Le manque de visibilité sur le marché français dans les 5 années à venir, en raison de l'évolution future des dispositifs d'aide à la filière éolienne ainsi que des problèmes d'acceptabilité de l'éolien en France, est un frein significatif dans la mesure où la réussite d'un nouvel acteur est souvent conditionnée à l'existence d'un marché domestique solide qui lui permet d'affronter la compétition internationale.

- Verrous réglementaires

Non identifiés

- Verrous technologiques

Non identifiés

4.6.6. Pistes d'action pour l'ADEME

- *Etude d'opportunité approfondie permettant de chiffrer plus précisément l'intérêt et l'impact de l'émergence d'un grand acteur français*
 - Etude des spécificités du marché français
 - Etude de l'équilibre économique d'un acteur de taille moyenne face aux grands concurrents
 - Evaluation du risque et des bénéfices de l'émergence d'un grand ensemble français
- *Etude des possibilités de renforcement de la stabilité du marché français ainsi que de la compétitivité des acteurs français*
 - Dispositif de soutien de la demande et de soutien de l'offre

5. Conclusion sur l'opportunité de l'économie circulaire pour l'éolien

Pour synthétiser les enjeux stratégiques que porte l'économie circulaire pour le secteur éolien, nous avons repris le cadre d'une l'analyse « Atout/Faiblesse – Opportunité/Menace » (analyse AFOM ou SWOT).

Atouts	Faiblesse
<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux en grande partie valorisables - Savoir-faire français sur l'ensemble des technologies et composants - Variantes technologiques en nombre limité - Marge de manœuvre pour augmenter la durée d'usage - Savoir-faire en exploitation de parc éolien - Ecosystème industriel pour l'éolien en mer en cours de consolidation 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de filière de valorisation pour les pales à l'issue de leur cycle de vie - Consommation de terres rares - Flux logistiques non optimisés - Ecoconception non mure - Expertise de maintenance et de reconditionnement peu développée - Ecosystème industriel pour l'éolien terrestre peu développé
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Améliorer l'efficacité matière et la recyclabilité : <ul style="list-style-type: none"> o Structurer une filière pour le recyclage des pales o Augmenter la part d'utilisation des matériaux recyclés, en phases fabrication et recyclage / reconditionnement - Allonger la durée d'exploitation - Accroître les bénéfices socio-économiques localisés : <ul style="list-style-type: none"> o Favoriser la montée en compétence des prestataires locaux pour la maintenance et le reconditionnement o Pérenniser les plateformes de fabrication des éoliennes maritimes avec le démantèlement des éoliennes terrestres o Augmenter la capacité de fabrication locale de mâts pour favoriser les achats locaux - Faire émerger un grand ensemble français pour optimiser le cycle de vie et les flux logistiques - Intégrer les critères d'économie circulaire dans les futurs appels d'offres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Surcapacité de fabrication (Europe, Chine, USA) - Incertitudes sur l'impact environnemental et économique de la fin de vie des pales - Incertitudes sur l'impact environnemental et économique des flux logistiques - Baisse des coûts matières (y compris terres rares) - Perte à moyen-terme des emplois liés aux écosystèmes industriels de l'éolien en mer

Au vu de l'ensemble des opportunités identifiées et des 6 opportunités analysés plus précisément, on peut conclure au potentiel stratégique important que représente l'économie circulaire pour le secteur éolien français. Ces opportunités forment un ensemble cohérent d'initiatives qui permettent d'améliorer la performance environnementale, économique et sociale de la filière éolienne en renforçant les activités industrielles et de services sur l'ensemble du cycle de vie : phase fabrication (optimisation des flux logistiques et fabrication locale), phase utilisation (maintenance, reconditionnement) et phase fin de vie des éoliennes (démantèlement, recyclage).

Alors que la filière a été jusque-là focalisée sur la résolution de challenges technologiques, l'industrialisation de la filière et la constitution d'un parc de première génération, l'économie circulaire représente une opportunité pour les 15 années à venir, que ce soit pour gagner en efficacité d'utilisation des ressources pour les flux entrants, ou pour traiter de manière efficace les flux sortants lors du démantèlement du parc actuellement installé.

Sur la dimension « **produit** », les principaux enjeux consistent à maîtriser la consommation des terres rares et à créer une filière de traitement spécifique pour les pales composites, mais aussi à maximiser l'utilisation des équipements, que ce soit par l'extension de la durée de vie de l'éolienne ou par le reconditionnement et la réutilisation de composants clés. La constitution d'une activité experte de maintenance /recyclage est une composante majeure de l'économie circulaire créatrice de valeur et d'emplois peu délocalisables.

Sur la dimension « **territoriale** », la France ne disposant pas de constructeur majeur, il y a un grand potentiel d'optimisation des flux logistiques et de service, par le rapatriement de valeur ajoutée à différents niveaux (constructeur, fabrication de tours, maintenance de 2^{ème} niveau), ce qui permettrait de limiter les transports et de monter en compétence sur l'ensemble de la chaîne de valeur, ceci pouvant se cristalliser par la constitution d'un ou plusieurs écosystèmes industriels pérennes.

Pour contribuer au développement de ces opportunités, plusieurs leviers peuvent être actionnés :

- Réaliser des études environnementales approfondies, afin de préciser ou de valider certaines opportunités du point de vue environnemental :
 - Analyse environnementale comparée de l'extension de la durée de vie et du *repowering*
 - Analyse de cycle de vie du recyclage des pales
 - Analyse de cycle de vie comparée des tours béton et acier
- Réaliser des études stratégiques et économiques pour valider la pertinence et l'impact de certaines opportunités :
 - Etat des lieux des savoir-faire et des compétences nécessaires au développement des opportunités (maintenance, démantèlement, ...)
 - Analyse économique des acteurs européens et du marché européen
 - Analyse de différents modèles d'affaire (en particulier sur le démantèlement, l'extension durée de vie et les nouvelles capacités de production)
 - Analyse des opportunités pour les acteurs français, notamment quant au positionnement d'un ensemble
 - Recommandations pour un dispositif de soutien permettant de donner de la visibilité aux acteurs français
- Soutenir l'innovation pour les écotecnologies dans l'éolien
 - Ex : Recyclage de composites, technologies innovantes de tours, réduction de la teneur en terres rares, ...
- Contribuer à faire intégrer des critères liés à l'économie circulaire dans les décisions publiques
 - Ex : Appels d'offres sur l'éolien
- Promouvoir le développement des opportunités
 - Favoriser la collaboration entre acteurs
 - Contribuer à faire émerger des formations pour l'acquisition des compétences nécessaires

Pour conclure, alors que la filière française éolienne est encore jeune et sans tête de file, la prise en compte de l'économie circulaire est une opportunité stratégique pour gagner en compétitivité et remonter la chaîne de valeur.

6. Annexe 1 : Bibliographie

Publications par technologie

- « LCA of ENERCON Wind Energy Converter E-82 E2 » - Enercon
- « LCA of Electricity Production from an Onshore V 100 - 2.6 MW wind plant » - Vestas, 2012
- « Life Cycle Assessment of electricity production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant » - Vestas, 2011
- « Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method » - E. Martinez *et al.*, Int. Journal of LCA, 2009
- “Life-cycle-assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW turbines” – Vestas, 2006
- « Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines » - K.R. Haapala *et al.*, Int. Journal of Sustainable Manufacturing, 2014
- « Bilan Carbone du parc éolien en mer au large de Fécamp » - EDF EN, 2013
- « Bilan Carbone du parc éolien en mer au large de Courseulles-sur-Mer » - EDF EN, 2013
- « Bilan Carbone du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire » - EDF EN, 2013

Autres publications

- « Critical metals in Strategic Energy Technologies » - Joint Research Center, 2011
- « 2013 JRC wind status report » – Joint Research Center, 2013
- « Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU Energy Sector » - Joint Research Center, 2013
- « Marchés, emplois et enjeu énergétique des activités liées à l’amélioration de l’efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2010-2011 – prévisions 2012 » – In Numeri, 2012
- « Analyse du marché et des emplois éoliens en France » - Bearing Point, France Energie Eolienne, 2014

7. Annexe 2: Hypothèses pour l'évaluation qualitative des opportunités

1. Hypothèses retenues pour l'opportunité « STRUCTURER UNE FILIERE POUR LE RECYCLAGE DES PALES »

- La durée de vie d'une éolienne avant démantèlement est de 20 ans.
- Le recyclage de 1 000 tonnes de composites par an génère l'emploi de 5 ETP et la revente de ces matières génère 750 € / t²¹.
- Le coût d'un procédé de recyclage de composites (lavage, granulation...) est de 530 € / t²².
- Le coût de l'incinération des matières composites est de 94 € / t²³.
- Le coût de la mise en décharge des matières composites est de 190 € / t²⁴.

2. Hypothèses retenues pour l'opportunité « FAVORISER L'EXTENSION DE LA DUREE DE VIE DES PARCS EOLIENS »

- Les coûts d'exploitation et maintenance en 2014 sont d'environ 45 k€/MW/an²⁵. On fait l'hypothèse qu'au-delà de 20 ans d'exploitation, pendant la période de prolongement du parc, les coûts d'exploitation et maintenance seront deux fois plus importants qu'avant, soit 90 k€/MW/an.
- En considérant un parc éolien dont le productible moyen est de 2000 h/an et en considérant un prix de 50 €/MWh pour le marché de gros de l'électricité, les recettes générées par l'exploitant pendant la phase d'allongement de la durée de vie atteignent 100 k€/MW/an, ce qui fait un bénéfice de 10 k€/MW/an, soit 50 k€/MW pour un allongement de 5 ans et donc 50 M€ pour une installation de parc de 1 000 MW/an.
- L'activité de maintenance représente environ 1,5 ETP/10 MW pour la filière éolienne française²⁶.
- La moyenne des coûts pour l'activité de maintenance sur les 20 premières années est d'environ 12 €/MWh²⁷. Au-delà de 20 ans, la moyenne des coûts de maintenance sur 5 ans est d'environ 18 €/MWh. En supposant que la moitié de ce surcoût est dû au remplacement de pièces qui devient plus fréquent en fin de vie, cela revient à un surcoût de 3 €/MWh dû aux techniciens qui viennent réaliser la maintenance. L'allongement de la durée de vie entraîne donc un regain d'activité de maintenance d'environ 25% pendant ces 5 années par rapport à une année standard.
- L'allongement d'un parc éolien (de 5 ans) entraîne une économie de matière sortante de 20%.
- Un parc éolien demande en moyenne 170 t de matière par MW pour la turbine et 460 t/MW pour les fondations²⁸. Soit, en supposant que l'on installe 1 000 W par an, une économie de 34 kt de matière pour la turbine (acier principalement) et 92 kt pour les fondations (béton principalement).

3. Hypothèses retenues pour l'opportunité « FAVORISER LA MONTEE EN COMPETENCE DES PRESTATAIRES LOCAUX POUR LES SERVICES DE RECONDITIONNEMENT ET DE MAINTENANCE »

- On considère un parc installé de 10 GW (ce qui est à peu près le cas fin 2015 pour l'éolien terrestre).
- D'après le rapport CRE de 2014²⁷, le coût d'exploitation total est de l'ordre de 45 k€/MW/an. La maintenance représente 51%²⁷ de ces coûts, soit environ 23 k€/MW/an. Ce chiffre, utilisé pour le modèle, doit être vu comme un ordre de grandeur ; aucune actualisation de ces coûts n'a été réalisée.
- En termes d'emploi, on compte pour la maintenance environ 1,5 ETP/10 MW²⁶.
- Les autres hypothèses ont été présentées dans le tableau inséré dans le corps du rapport.

²¹ Source : AB Val Composites.

²² Source : Usine Nouvelle.

²³ Source ADEME (pour l'incinération des ordures ménagères).

²⁴ Données entretiens constructeurs.

²⁵ Rapport CRE « Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine » avril 2014.

²⁶ Etude ADEME 2014 sur les Marchés et Emplois liés à l'efficacité énergétique et aux EnR.

²⁷ Données entretiens exploitants.

²⁸ Analyse de flux - I Care Environnement.

4. Hypothèses retenues pour l'opportunité « AUGMENTER LA CAPACITE DE FABRICATION DES TOURS EN FRANCE POUR FAVORISER LES ACHATS LOCAUX »

Le modèle simplifié présenté en section 4.5 a été construit en suivant les hypothèses suivantes :

- L'analyse sera réduite à l'étude des mâts en acier qui représentent la part principale du marché.
- Le volume installé en éolien dans l'année est de 1 000 MW. On considère que 90% des mâts installés sont en acier, soit 900 MW.
- Le fabricant de mâts déjà existant détient 40% du marché (360 MW).
- On considère que la fabrication d'un mât acier de 2 MW génère environ un emploi à taux plein (ETP).
- Le coût d'un mât revient à environ 240 k€/MW²⁹. Toutefois, l'acier n'est pas produit en France et constitue environ 70% du prix du mât donc la valeur générée sur le territoire français pour la fabrication de mât représente environ 72 k€/MW.
- La fabrication d'un mât sur le territoire français plutôt que dans les pays voisins limitrophes (Allemagne et Danemark) permet d'économiser environ 600 km de fret.
- Le transport d'un segment de 60 tonnes génère 100 g.éqCO₂/t.km (ce qui est une borne supérieure car la valeur de 105 g.éqCO₂/t.km s'applique normalement pour une charge de 40 t). A noter que le coût du transport augmente avec la hauteur et le diamètre des mâts.
- Un mât se compose de 4 segments.

5. Hypothèses retenues pour l'opportunité « FAIRE EMERGER UN GRAND ENSEMBLIER FRANÇAIS »

Le modèle simplifié présenté en section 4.6 a été construit en suivant les hypothèses suivantes :

- Plus de 1000 MW de puissance éolienne ont été raccordés en France en 2014, ainsi qu'en 2015³⁰.
- Les constructeurs français actuels (Alstom et Vergnet) n'occupent que 1% du marché de 2014.
- L'investissement dans un parc éolien est d'environ 1,3 M€/MW. La turbine représente 77%³¹ de ce coût total. Parmi ces 77%, le mât, souvent produit localement par un fournisseur autre (sauf pour certains constructeurs comme Enercon), compte pour 26,3%. Par conséquent, une turbine construite par un assembleur représente un chiffre d'affaire d'environ **0,73 M€/MW**.
- En 2013, le premier constructeur mondial, Vestas, avait une part de marché de 12,3% représentant 4,4 GW installés. L'entreprise compte environ 20 000 employés ce qui fait environ **4,5 emplois directs par MW**.
- La fabrication d'un mât sur le territoire français plutôt que dans les pays voisins limitrophes (Allemagne et Danemark) permet d'économiser environ 600 km de fret.
- Une éolienne sans le mât pèse environ 40 tonnes. Le transport d'un segment de 40 t génère environ 105 g.éqCO₂/t.km² ³².

²⁹ Modèle de coût basé sur les données de l'EWEA.

³⁰ RTE, Bilans électriques 2014 et 2015.

³¹ The Economics of Wind Energy, EWEA.

³² Base Carbone de l'ADEME.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr