

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Face au vieillissement du parc éolien français et au défi du
démantèlement dans les prochaines années : quelles solutions
pour une gestion efficace et globale des déchets ?**

Le cas des pales.

Mémoire de Fin d'Études présenté par
PIERSMA Delphine
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG

Année Académique : 2021 - 2022

Directeur : Prof. Wouter ACHTEN

Je tiens tout d'abord à remercier Mr. Achten pour son accompagnement et ses conseils dans l'écriture de ce mémoire.

Je veux également remercier ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de ce projet, et qui ont pris le temps de relire avec attention mon travail.

Merci également à Perrine pour sa disponibilité, son écoute et ses précieux conseils.

Enfin, je tiens à remercier mes collègues de travail qui m'ont encouragés sans faille tout au long de ce master.

Résumé

Dans sa course aux réductions d'émissions de gaz à effet de serre afin de limiter les effets du réchauffement climatique, l'Europe encourage la transition vers une production d'énergie bas carbone. L'énergie éolienne est au cœur de cette stratégie et se développe sur le territoire français depuis le début des années 2000. Avec une durée de vie moyenne d'une vingtaine d'années, les premiers dispositifs arrivent aujourd'hui en fin de vie et doivent être démantelées. Bien que plus de 90% en masse d'une éolienne puisse être valorisée par des filières de recyclage existantes, les pales, principalement constituées de matériaux composites à base de fibres de verre et d'une matrice thermodurcissable, sont difficilement recyclables. Pourtant, plus de 1500 éoliennes seront à démanteler d'ici 2025. Dans un contexte évoluant de plus en plus vers une économie circulaire, le nombre croissant d'aérogénérateurs arrivant en fin de vie dans les prochaines années nous a interrogé quant au devenir des déchets de pales.

Bien qu'il existe une législation encadrant le démantèlement des éoliennes en France, les obligations concernant la gestion des pales en fin de vie restent marginales. La réglementation évolue et se concentre à la fois sur le démantèlement des éoliennes d'aujourd'hui et sur la conception des éoliennes de demain avec un accent sur l'écoconception. Le cadre législatif représente un levier d'action considérable pour la mise en place de solutions favorisant les actions du haut de la hiérarchie de traitement des déchets établi par le code de l'environnement.

Le cœur de notre étude consiste à dresser le bilan environnemental de trois scénarios de gestion des pales d'éoliennes en fin de vie grâce à une analyse de cycle de vie. A la suite d'une revue de littérature sur les stratégies de gestion des déchets existants, trois scénarios jugés pertinents ont été sélectionnés : l'enfouissement, l'incinération avec valorisation énergétique et le co-traitement en four à ciment en Allemagne. Le logiciel SimaPro, la méthode de calcul ReCiPe016, ainsi que la base de données EcoInvent ont été utilisés. Nous avons analysé quatre catégories d'impact : le changement climatique, l'épuisement des ressources minérales et fossiles, ainsi que la toxicité humaine cancérigène. En considérant l'approche cut-off, l'enfouissement semble la méthode avec le plus faible impact sur l'environnement. Cependant, dès lors où les crédits d'impact sont comptabilisés, le co-traitement en four à ciment à une échelle locale à la meilleure performance environnementale.

Nous avons pu lister une série de recommandations : 1) améliorer l'accessibilité des données 2) renforcer la législation pour la gestion des déchets et les nouvelles productions 3) favoriser la valorisation des déchets par la méthode de co-traitement en four à ciment, en minimisant les distances de transport entre les sites de traitement 4) maximiser les substitutions de matières et le recyclage.

Des avancées technologiques dans le domaine du recyclage des matériaux composites pourraient voir le jour dans les années à venir. Il serait alors intéressant d'en évaluer les performances environnementales et de les comparer à nos résultats.

Table des matières

Résumé.....	3
Liste des figures	6
Liste des photos.....	7
Liste des tableaux	7
Liste des abréviations.....	8
I. Introduction.....	9
1. Contexte	9
2. Questions et objectifs de recherche.....	10
II. L'éolien – Généralité.....	11
1. L'éolien en France en quelques chiffres	11
2. Le fonctionnement de l'énergie éolienne	14
3. Structure et matériaux.....	14
3.1. Les fondations	15
3.2. Le mât.....	15
3.3. La nacelle.....	15
3.4. Le rotor : moyeu et pales	15
4. L'économie circulaire et le cadre législatif.....	17
III. Gestion de la fin de vie des pales d'éoliennes - état de l'art	21
1. La prévention – déchet évité	22
2. Le réemploi et la réutilisation.....	23
2.1. Le réemploi.....	23
2.2. La réutilisation.....	23
3. Le recyclage.....	24
3.1. Le recyclage mécanique	24
3.2. Le recyclage thermique – la pyrolyse.....	26
3.3. Le co-traitement en four à ciment	27
4. Valorisation énergétique par incinération.....	28

5.	<i>Élimination/ enfouissement</i>	28
IV.	Analyse de cycle de vie	30
1.	<i>Définition et cadre méthodologique</i>	30
2.	<i>Objectifs de l'étude et choix des impacts environnementaux</i>	32
3.	<i>Cadre analytique : unité fonctionnelle et frontières du système</i>	33
3.1.	Unité fonctionnelle	33
3.2.	Frontières du système : référentiel géographique et temporel.....	33
4.	<i>Description des scénarios</i>	34
4.1.	Scénario 1 : l'enfouissement	35
4.2.	Scénario 2 : l'incinération avec valorisation énergétique et recyclage du métal.....	35
4.3.	Scénario 3 : le co-traitement en four à ciment.....	37
5.	<i>Collecte des données pour les différents scénarios</i>	38
5.1.	Phase de transport.....	38
5.2.	Procédé de transformation : le broyage	38
5.3.	Substitution de combustibles fossiles	39
5.4.	Substitution de matières premières en cimenterie	39
6.	<i>Résultats/ Discussion</i>	39
6.1.	Scénario 1 : l'enfouissement	40
6.2.	Scénario 2 : l'incinération avec valorisation énergétique.....	42
6.3.	Scénario 3 : le co-traitement en four à ciment.....	43
6.4.	Influence des crédits d'impact sur les résultats	44
7.	<i>Analyse de sensibilité</i>	45
8.	<i>Scénario à privilégier</i>	49
V.	Conclusion et recommandations	51
	Bibliographie	55
	Annexes	60

Liste des figures

Figure 1: évolution de la production éolienne en France (7).....	11
Figure 2: évolution annuelle de la capacité installée du parc éolien français et objectif de la PPE (7) 12	
Figure 3: évolution de la masse annuelle de matériaux composites issue du démantèlement des éoliennes terrestres en France – représentation libre des données issues du rapport (3).....	13
Figure 4: Age de la flotte des parcs éoliens onshore européens (11)	13
Figure 5: composition d'une éolienne	15
Figure 6: coupe transversale d'une pale d'éolienne.....	16
Figure 7: cycle de vie d'une éolienne (WindEurope).....	18
Figure 8: hiérarchie de traitement des déchets d'après le Code de l'Environnement (20).....	18
Figure 9: description du procédé de recyclage mécanique (traduction libre de WindEurope).....	25
Figure 10: description du procédé de recyclage thermique (traduction libre de WindEurope).....	26
Figure 11: description du procédé de recyclage par co-traitement en four à ciment (traduction libre de WindEurope).....	28
Figure 12: gisement annuel de déchets composites issus de la filière éolienne en 2030 (ADEME).....	34
Figure 13: description du scénario 1	35
Figure 14: description du scénario 2.....	36
Figure 15: description du scénario 3.....	37
Figure 16: comparaison des impacts environnementaux pour les différents scénarios – approche cut off.....	40
Figure 17: scénario 1 – enfouissement - détails des contributions aux quatre catégories d'impact.....	41
Figure 18: scénario 2 – incinération - détails des contributions aux quatre catégories d'impact.....	43
Figure 19: scénario 3 – co-traitement en Allemagne- détails des contributions aux quatre catégories d'impact	44
Figure 20: comparaison des impacts environnementaux des différents scénarios – avec crédits d'impact	45
Figure 21: comparaison des impacts environnementaux des scénarios 2, 3 et 4 – avec crédits d'impact	47

Figure 22: comparaison des impacts environnementaux pour les scénarios 3, scénario 3 avec 40% de substitution matière en cimenterie et scénario 4 – avec crédits d’impact.....	48
Figure 23: contribution des crédits d’impact de recyclage métal, de substitution ciment et de combustible fossiles, pour chacune des catégories d'impact, pour les scénarios 3 et scénario 3 avec 40% de substitution ciment.....	49
Figure 24: cartographie française représentant : à gauche : le gisement annuel de déchets composites issues de la filière éolienne attendu en 2030 ; à droite : les sites de préparation de CSR (en rouge) et les cimenteries (en noir) - ADEME	50
Figure 25: Les 36 sites de préparation du CSR identifiés sur le territoire français (24)	60
Figure 26: Les 29 cimenteries identifiées sur le territoire français (24).....	61

Liste des photos

Picture 1: exemples de réutilisation : (a) une aire de jeu pour enfants aux Pays-Bas, (b) des bancs aux Pays-Bas, (c) un abri pour vélos au Danemark.....	24
Picture 2: (a) pastilles Ecopoly produites par GFS (b) planche pour la construction produite par GFS (c) poubelle produite par Reprocover	26
Picture 3: comparaison de l'état d'une pale (a) avant pyrolyse (b) après pyrolyse (31)	27
Picture 4: tapis d'isolation en fibres de verre recyclée (31).....	27
Picture 5: pales d'éoliennes sur le site d'enfouissement de Casper (35)	29

Liste des tableaux

Table 1: Calcul des masses des différents matériaux utilisés dans les pales d'éoliennes pour une puissance de 1MW.....	17
Table 2: tableau récapitulatif de l'évolution de la réglementation concernant le démantèlement des rotors (Légifrance, Arrêté du 22 juin 2020 du Code de l'environnement 2022).....	19
Table 3: distances entre les sites de traitement pour les différents scénarios.....	38
Table 4: scénario 1 – enfouissement - résultats de l'ACV pour les quatre catégories d'impacts analysées.....	41
Table 5: scénario 2 – incinération - résultats de l'ACV pour les quatre catégories d'impacts analysées.	42
Table 6: scénario 3 – incinération en Allemagne - résultats de l'ACV pour les quatre catégories d'impacts analysées.....	43

Table 7: distance entre les sites de traitement pour les différents scénarios46

Table 8: comparaison des impacts environnementaux des scenario 2, 3 et 4 – approche cut-off46

Liste des abréviations

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie

PRV : Polymère Renforcé aux fibres de Verre

PPE : Programmation Pluriannuelle de l'énergie

RTE : Réseau de Transport d'Électricité

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

FEE : France Énergie Éolienne

TRL : Technology readiness level

CSR : Combustible Solide de Récupération

UF : Unité Fonctionnelle

DND : Déchets Non Dangereux

ISDND : Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

I. Introduction

1. Contexte

Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de lutter contre le réchauffement climatique comme préconisé par les accords de Paris en 2015, les énergies renouvelables remplacent peu à peu les énergies fossiles. Dans le cadre de cette transition, l'Union Européenne a pour objectif de devenir neutre en carbone d'ici à 2050, et souligne l'importance des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen et notamment de l'énergie éolienne (1). Celle-ci produisait environ 15% de l'électricité européenne en 2021, et le secteur employait plus de 300 000 personnes à travers l'Europe (2).

La durée de vie standard d'une éolienne est établie à une vingtaine d'années. Avec le boom de l'énergie éolienne dans les années 2000, le parc éolien Français voit aujourd'hui ses premiers dispositifs arriver en fin de vie. De plus, grâce au développement de la recherche et aux avancées technologiques, un certain nombre de dispositifs subissent ce qu'on appelle un « repowering », procédure qui consiste à remplacer une turbine par une plus récente et performante. Le recours à cette pratique étant en constante croissance, le nombre d'éoliennes à démanteler l'est également.

Dans son rapport de 2019 sur l'économie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, l'Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME) estimait à 1500 le nombre d'éoliennes à démanteler d'ici 2025. Elle évalue également un flux annuel de 17000 tonnes de pale d'éolienne issues du démantèlement en 2030 (3). A l'échelle mondiale, c'est un total de 43 millions de tonnes de déchets de pale d'éoliennes qui seront accumulés d'ici 2050, dont 25% en Europe (4).

La gestion du démantèlement est une problématique à la fois récente et encore peu étudiée. Bien qu'environ 90% en masse d'une éolienne puisse être recyclée par des filières existantes (majoritairement de l'acier et du béton dans le mât et les fondations), les pales restent un challenge. Elles sont composées de matériaux composites aux propriétés mécaniques qui leur permettent de résister aux conditions environnementales extrêmes et ce souvent même après leurs vingt années de service. La séparation des matériaux composites thermosensibles ainsi que leur recyclage est très difficile (5).

Avec le nombre grandissant de dispositifs à démanteler, la question de la gestion des déchets de pales d'éoliennes devient un enjeu environnemental important et crucial. Les matériaux utilisés doivent être valorisés et leur non-recyclage va à l'encontre du paradigme de circularité associé aux énergies renouvelables. De plus, les éoliennes étant des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), la question de leur fin de vie doit être anticipée.

2. Questions et objectifs de recherche

Aujourd'hui entre 85% et 90% de la masse totale d'une éolienne peut être recyclée (6). L'acier et le béton, qui représentent environ 90% du poids total d'une éolienne terrestre, sont des matériaux totalement recyclables dans les filières de recyclage existantes et bien établies. La gestion de fin de vie des déchets de pales reste quant à elle problématique.

Le nombre d'aérogénérateur en fin de vie ne cessera de croître dans les prochaines années menant à une augmentation considérable des déchets de pales d'éoliennes.

Face au vieillissement du parc éolien français et au défi de leur démantèlement dans les prochaines années, quelles solutions pour une gestion des déchets efficace et globale des pales d'éoliennes ?

Dans la première partie, nous ferons un tour d'horizon de l'éolien français. Nous aborderons le fonctionnement des éoliennes, la composition de leurs différents éléments ainsi que la législation encadrant leur démantèlement.

Dans une deuxième partie et en nous basant sur une revue de la littérature, nous dresserons l'état des connaissances sur les différentes méthodes existantes de gestion des déchets de pales.

Quelles sont les méthodes de valorisation des pales existantes ? Comment minimiser et valoriser ces déchets selon les différentes filières ?

Enfin, dans une dernière partie, nous tenterons de répondre à la problématique de la gestion des pales en fin de vie. Pour cela, nous avons établis et choisi trois scénarios de gestion sur la base de notre revue de l'état de l'art. Une Analyse de Cycle de Vie (ACV) nous permettra d'une part, de mesurer la performance environnementale de chacun de ces scénarios et d'autre part de les comparer entre eux pour les catégories d'impact sélectionnées.

Quelles recommandations peut-on faire quant au traitement des futurs flux de pales d'éoliennes en fin de vie ? Quelles améliorations peut-on suggérer pour la gestion des déchets composites provenant du secteur éolien ?

II. L'éolien – Généralité

1. L'éolien en France en quelques chiffres

D'après le bilan du Réseau de Transport Électrique français (RTE), la production d'électricité d'origine éolienne est en constante croissance depuis le début des années 2000, malgré une baisse de 7% en 2021 par rapport à l'année 2020 majoritairement dû à des conditions de vent défavorables. La production totale d'électricité fournie par énergie éolienne dans le mix énergétique français a atteint 7% pour l'année 2021, soit 38,6 TWh (figure 1). Avec ses 5,2 GW de puissance, la région des Hauts-de-France est la région avec la plus grande capacité installée. Sa production a permis de couvrir 2,1% de la consommation électrique nationale sur l'année 2021. Les régions Ile-de-France et Provence-Alpes-Côte d'Azur représentent quant à elles une infime part de la puissance nationale installée, avec seulement un peu plus de 2,2 MW (7).

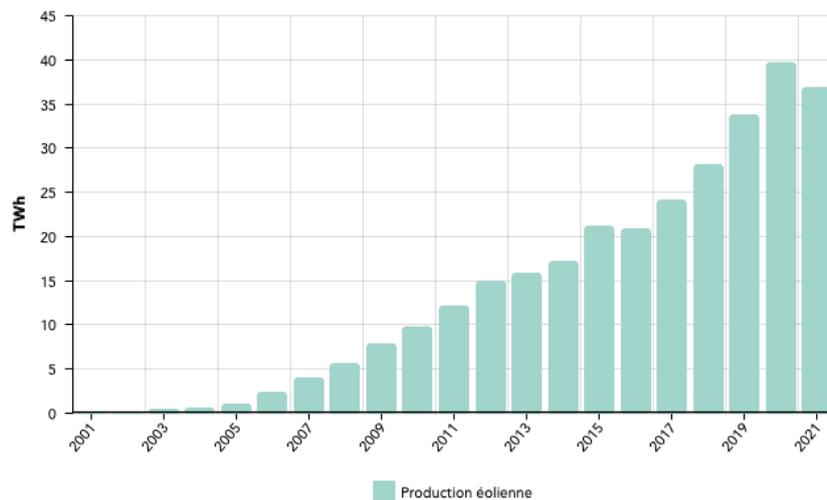


Figure 1: évolution de la production éolienne en France (7)

La filière éolienne représente un moteur socio-économique fort, avec plus de 22600 emplois répartis au sein de 900 entreprises sur le territoire français à l'horizon 2021 (8). Ces emplois se retrouvent tout au long de la chaîne de valeur du secteur : la recherche et développement, l'industrie, l'exploitation, la maintenance, la production des composants etc.

Le parc éolien français n'a cessé de croître, et comptait une puissance installée de 18,8 GW au 31 décembre 2021 (figure 2). La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) a été instituée par l'article 176 de la loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 (9). Cette Programmation fixe les objectifs et la stratégie nationale dans le cadre de la transition énergétique. Pour le secteur de l'éolien, elle prévoit une puissance totale installée de 24,1GW au 31 décembre 2023, soit une augmentation de 2,65GW par an par rapport à fin 2021 (10).

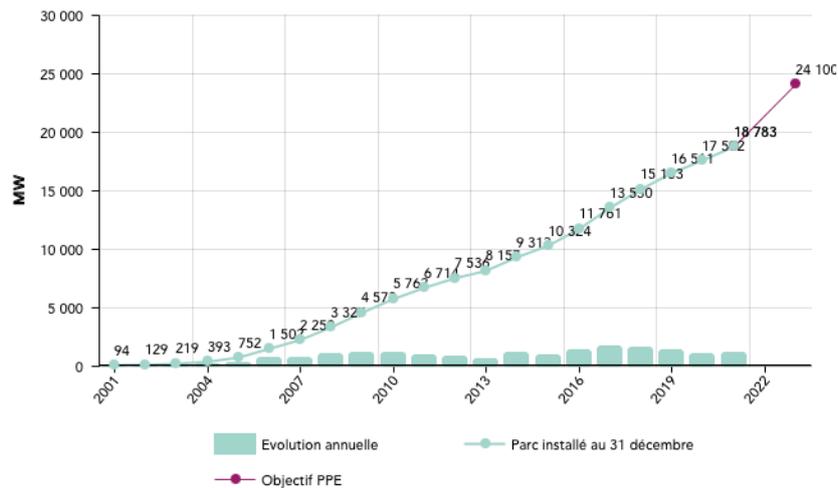


Figure 2: évolution annuelle de la capacité installée du parc éolien français et objectif de la PPE (7)

D'après les données de l'ADEME, et en parallèle de la croissance du parc éolien français, un grand nombre de dispositifs vont arriver en fin de vie dans les prochaines années, en considérant une moyenne de vingt ans de fonctionnement.

En connaissant le nombre de dispositifs installés par année et en sachant qu'un aérogénérateur standard possède 3 pales, il est possible de calculer l'évolution attendue du flux de matériaux composites issus des pales d'éoliennes à démanteler jusqu'en 2038. Grâce aux hypothèses émises sur la répartition des différentes technologies d'éoliennes terrestres sur le territoire (de types Enercon, Vestas, Nordex/Acciona, etc.), l'ADEME estime la masse moyenne pondérée de matériaux composites à environ 11 tonnes/MW installé. Les chiffres exposés dans la figure 3 indiquent une croissance annuelle rapide des flux de matériaux composites jusqu'en 2030, puis une diminution pendant quelques années avant de augmenter. Les variations générales observées correspondent à l'évolution des installations vingt ans auparavant. Il est intéressant de souligner que la légère décroissance prévue jusqu'aux années 2035 est également accentuée par les améliorations technologiques passées qui permettent aux pales d'éoliennes d'améliorer leur performance tout en gagnant en légèreté (3). Le graphique montre également que le flux annuel de déchets de matériaux composites sera multiplié par 15 entre les années 2022 et 2030.

L'augmentation du flux des matériaux composites à l'échelle nationale, ainsi que l'accumulation de déchets qui en résultent, met en évidence l'urgence de leur gestion efficace et globale. La nécessité de valoriser ces matériaux arrivant en fin de vie paraît incontestable dans le contexte de la transition vers une économie circulaire. Pour rappel, le monde fera face à une accumulation d'environ 43 millions de tonnes de déchets de pale d'éoliennes d'ici 2050.



Figure 3: évolution de la masse annuelle de matériaux composites issue du démantèlement des éoliennes terrestres en France – représentation libre des données issues du rapport (3).

En 2020, la France se plaçait au troisième rang européen en termes de capacité installée sur son territoire terrestre (éoliennes dites « onshore »). La figure 4 montre le vieillissement des parcs nationaux européens par tranches d'âge de cinq années. Une éolienne étant considérée en fin de vie après 20 ans d'exploitation, la figure ci-dessous souligne la nouveauté de cette problématique. Cette étude nous a permis d'orienter nos recherches sur les méthodes de gestion de fin de vie pratiquées dans les pays avec les parcs les plus vieillissants, partant de l'hypothèse que des stratégies de gestion seraient déjà développées et en place. Pour cela, nous avons pris en compte les parcs âgés de 15 ans et plus et déterminé qu'environ 50% des parcs allemands et 26% des parcs espagnols sont dans cette tranche, contre seulement 6% pour la France. De plus, bien que le Danemark ait une capacité installée bien plus faible que la France, il reste pionnier européen dans cette technologie, et environ 60% de son parc est vieillissant (15 ans et plus).

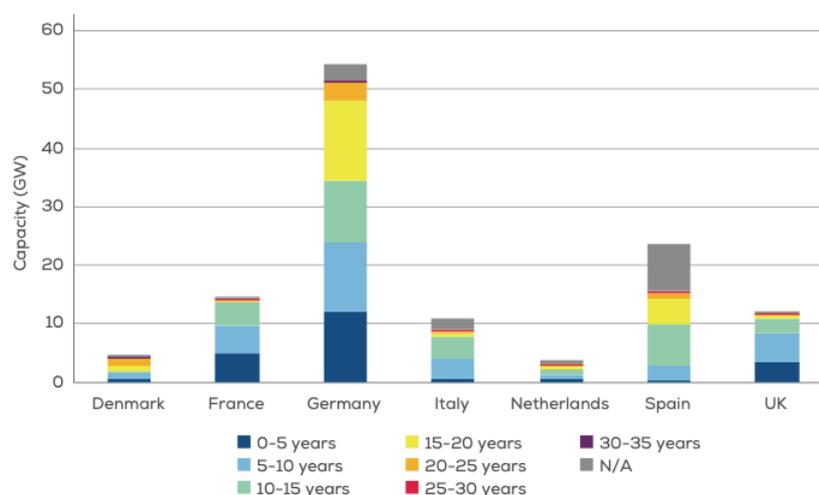


Figure 4: Age de la flotte des parcs éoliens onshore européens (11)

2. Le fonctionnement de l'énergie éolienne

Une éolienne utilise la force cinétique du vent pour produire de l'électricité. L'énergie issue de cette transformation est qualifiée de renouvelable, au même titre que celles issues du photovoltaïque, de la géothermie et de la biomasse par exemple. Le recours de manière complémentaire à ces énergies est nécessaire afin de garantir la transition vers une économie bas carbone, en constituant des alternatives aux énergies fossiles.

Le vent étant une ressource inépuisable mais variable dans l'espace et au cours du temps, les éoliennes installées ne fonctionnent pas à plein régime et toute l'année. C'est pourquoi, l'énergie éolienne est qualifiée de renouvelable intermittente dont la production varie. Le facteur de charge (en %) fournit une indication par rapport à la rentabilité d'un dispositif. Il est défini comme le rapport entre l'énergie délivrée pendant une certaine période de temps et l'énergie qu'aurait délivré le dispositif pendant cette même période à puissance nominale. D'après la RTE, le facteur de charge moyen sur l'année 2021 était aux alentours de 23% (ce qui équivaut à 2100h à plein régime par an). Cependant, les progrès technologiques récents pourraient permettre une augmentation de ce facteur de charge aux alentours de 30% à l'horizon 2028 (7). Notamment grâce à des machines plus hautes permettant d'aller chercher des vents plus hauts et plus constants, et des rotors plus larges qui permettent de fonctionner avec des vents plus faibles.

Pour les technologies les plus répandues en France, une girouette au sommet de la nacelle permet à l'éolienne de s'orienter face au vent et de mesurer la vitesse de celui-ci. L'éolienne fonctionne généralement dans une plage de vent allant de 10 à 90 km/h, vitesse au-delà de laquelle le fonctionnement peut s'avérer dangereux. Le plus souvent, l'arbre de rotation tourne à la même vitesse que les pales et est ensuite accéléré grâce à une boîte de vitesse permettant d'atteindre jusqu'à 1800 tours par minute (technologie asynchrone). L'énergie cinétique de rotation est ensuite transformée en électricité grâce au générateur. Il existe d'autres types d'éoliennes où l'arbre initial est directement relié au générateur (technologie synchrone). Une fois produite, l'électricité est transportée depuis l'éolienne par des câbles enfouis dans le sol vers une station de transformation afin de pouvoir intégrer le réseau électrique jusqu'à nos maisons (12).

A titre informatif, le fonctionnement d'une éolienne de 2MW couvre environ les besoins de 1000 foyers en électricité (en considérant une consommation moyenne de 4200 MWh/an) (13).

3. Structure et matériaux

La figure 5 schématise les différents composants d'un aérogénérateur. De manière générale, quatre parties principales peuvent être distinguées, dont les fonctionnalités et caractéristiques sont les expliquées ci-dessous.

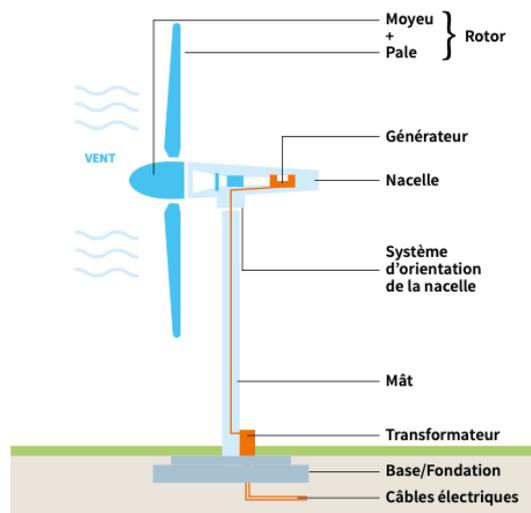


Figure 5: composition d'une éolienne

3.1. Les fondations

Les fondations permettent l'ancrage au sol et la stabilité de l'éolienne. Pour une éolienne de puissance moyenne de 2MW, une partie du sol est excavée afin d'y verser plus de 600 tonnes de béton, 25 tonnes d'acier et 400 tonnes de terre recouvrant le radier (14). Le diamètre de ces fondations peut atteindre 20 mètres sur une profondeur d'environ 3 mètres. A ce titre, les fondations représentent la partie avec la masse la plus importante de l'éolienne.

3.2. Le mât

Le mât permet le support de la nacelle et du rotor, et peut être construit en béton ou en acier. Sa hauteur varie entre 10 et 120 mètres. Les plus grandes sont capables de capter des vents qui soufflent plus forts et de manière plus constante. D'après le rapport de l'ADEME, les mâts en acier sont plus répandus, représentant environ 90% des modèles installés (3).

3.3. La nacelle

La nacelle permet le support du rotor et la conversion de l'énergie mécanique en électricité au niveau du générateur. On définit deux grandes familles de chaîne de conversion électromagnétiques : à entraînement direct (technologie synchrone – 33% du marché français) et à entraînement indirect (technologie asynchrone – 67%). Les éoliennes à entraînement direct comportent la plupart du temps des rotors bobinés, et seulement parfois des aimants permanents avec des terres rares (3% du parc éolien français).

3.4. Le rotor : moyeu et pales

Le rotor permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il est constitué du moyeu et des pales (généralement au nombre de trois), représentant respectivement environ 40% et 55% en masse du rotor, d'après l'ADEME.

Bien que plusieurs technologies et constructeurs d'éoliennes terrestres existent sur le marché, la composition des pales reste globalement similaire. En effet, les pales devant répondre à des contraintes environnementales importantes, une combinaison de matériaux aux propriétés spécifiques s'allie. Elles sont principalement constituées de matériaux composites (entre 80% et 90% en masse d'après l'ADEME), leur procurant les propriétés mécaniques de haute résistance et de légèreté. La norme NF EN ISO 472 définit un matériau composite comme « un produit solide comportant au moins deux phases distinctes comprenant un matériau de liaison (matrice) et un matériau sous forme particulière ou fibreuse » (15). Dans notre cas la matrice est un plastique thermdurcissable, et les fibres de verre constituent le matériau de renforcement.

Nous avons contacté plusieurs organismes (ADEME, FFE, LMwind, etc.), afin d'obtenir des chiffres précis quant à la répartition des modèles d'éoliennes sur le territoire français, ainsi que le modèle vieillissant principal. Nos demandes de renseignements et d'entretiens sont malheureusement très souvent restés sans réponse. Dans le cadre de ce mémoire et face à la difficulté rencontrée lors de la récolte d'informations, les données de plusieurs recherches menées dans les dernières années ont servi de base à notre étude (11), (16), (17). Nous avons ainsi déterminé la composition standard d'une pale d'éolienne, constituée des éléments suivants :

1. Une matrice en polymères thermdurcissables (résine époxy ou polyester) – 30-40% en masse.
2. Des fibres de renforcement (fibres de verre et/ou de carbone). Les pales devenant de plus en plus longues, leur poids ainsi que leur résistance mécanique deviennent un problème. Les fibres de carbonées, introduites en 2015, sont de plus en plus utilisées pour leurs propriétés de rigidification (18). Dans le cadre de notre étude, la plupart des éoliennes arrivant en fin de vie sont principalement composées à base de fibre de verre – 60-70% en masse.
3. Une structure centrale en bois (balsa) ou en mousse de PVC et adhésifs/ peinture – 9% en masse.
4. Des matériaux d'assemblage (métal) : boulons, vis – 2-8% en masse.

La figure 6 représente une coupe transversale de l'intérieur d'une pale, où les différents éléments cités ci-dessus sont exposés :

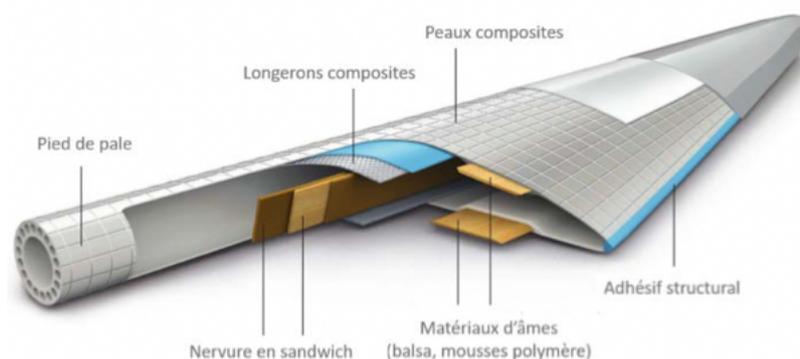


Figure 6: coupe transversale d'une pale d'éolienne

Pour rappel, l'ADEME estime la masse moyenne de matériaux composites à environ 11 tonnes/MW. En faisant l'hypothèse que la mousse PVC représente 9% et les métaux 5% de la masse totale, les 86% restant sont alors les matériaux composites. Nous choisissons de calculer la masse totale moyenne de matériaux utilisé pour 1MW de puissance installée. Celle-ci correspond à une masse totale de 12,8 tonnes, dont la répartition entre les différents matériaux est indiquée dans la tableau 1. Les masses sont également exprimées en kilogramme afin de faciliter la suite de notre analyse.

Table 1: Calcul des masses des différents matériaux utilisés dans les pales d'éoliennes pour une puissance de 1MW

Composant/ matériau	Pourcentage massique (%)	Masse moyenne pour 1MW (t)	Masse moyenne pour 1MW (kg)
Matrice polymère (Epoxy)	$0,35 * 86 = 30\%$	$0,30 * 12,8 = 3,84$	3840
Fibres de verre	$0,65 * 86 = 56\%$	$0,56 * 12,8 = 7,17$	7170
Mousses et adhésifs (PVC)	9%	$0,09 * 12,8 = 1,15$	1150
Métal (acier)	5%	$0,05 * 12,8 = 0,64$	640

4. L'économie circulaire et le cadre législatif

En opposition à la définition de l'économie circulaire, le modèle économique classique repose sur une démarche linéaire du type : extraction des matières premières – transformation – transport – usage – mise en décharge. Il repose sur le paradigme que les ressources sont infinies et a donc un grand impact sur l'environnement par la surconsommation, la pollution, la consommation d'énergie et la production de déchets.

Dans la loi relative à la transition vers une économie circulaire du 18 aout 2015, l'économie circulaire est définie de la manière suivante (9) :

« La transition vers une économie circulaire vise à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets. »

La figure 7 propose un modèle d'économie circulaire appliqué au secteur de l'éolien. Il est intéressant de noter, que l'étape de fin de vie est divisée en deux stratégies consécutives. La première vise à encourager l'allongement de la durée de vie du dispositif ou le repowering. La seconde implique le démantelant et le traitement final des déchets.

De plus, l'économie circulaire encourage à considérer les flux de déchets comme ressource. Elle favorise un cycle court, par le partenariat entre acteurs industriels locaux par exemple (exploitants, cimenteries etc..).

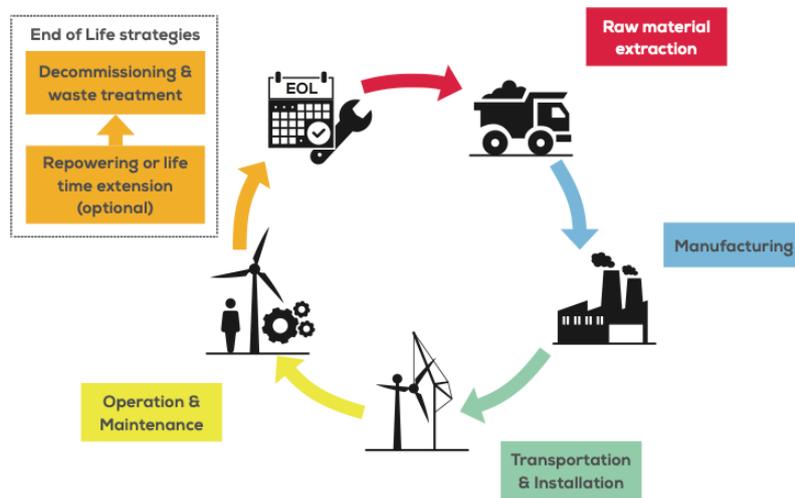


Figure 7: cycle de vie d'une éolienne (WindEurope)

La réglementation européenne figurant dans la directive-cadre sur la gestion des déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008 a été transposée en droit français dans l'article L541-1 du Code de l'Environnement (19). Celui-ci établit une hiérarchisation des modes de traitement des déchets dans le cadre de la transition vers une économie circulaire. Les modes de traitement sont catégorisés et schématisés dans la figure 8, sous forme d'une pyramide allant de la solution la plus recommandée (la prévention) à celle à éviter au maximum (l'élimination). Le code de l'environnement prévoit donc d'abord la prévention, puis le réemploi, le recyclage, la valorisation énergétique, puis en dernier recours l'élimination.

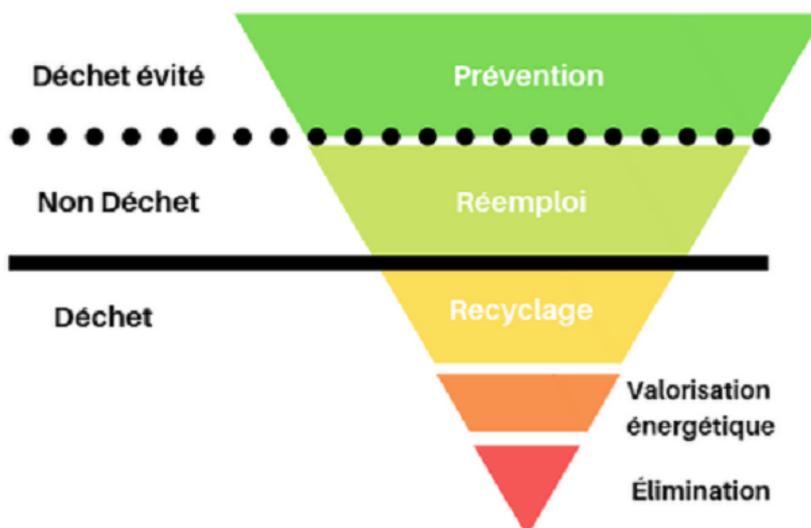


Figure 8: hiérarchie de traitement des déchets d'après le Code de l'Environnement (20)

La Fédération France Éolienne (FFE), a transposé ces différentes stratégies au secteur de l'éolien en explicitant les actions suivantes pour chacune des catégories (allant de la solution la plus à la moins recommandée) : allongement de la durée de vie et optimisation des matériaux utilisés ; prévision d'une « seconde vie » des éoliennes ; recyclage des matériaux par traitement des matières ; valorisation thermique ou énergétique ; l'élimination par mise en décharge.

De plus, l'arrêté du 22 Juin 2020 du Code de l'Environnement détaille les opérations de démantèlement obligatoires et prévoit la constitution des garanties financières destinées à les couvrir (19). Des frais d'un montant de 50000 euros par éolienne de puissance de 2MW et de 10000 euros par MW supplémentaire doivent ainsi être anticipés dès le début du projet. A titre indicatif, les frais de déconstruction seraient sous-estimés selon un ingénieur du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Les coûts réels du démantèlement sont estimés à 300000 euros minimum (20).

Le démantèlement est prévu par l'exploitant et comprend les éléments suivants :

1. Le démontage des aérogénérateurs, du poste électrique ainsi que des câbles dans un rayon de 10 mètres autour du dispositif.
2. L'excavation de la totalité des fondations et leur remplacement par des terres de nature similaire aux terres proches du site.
3. La remise en état des terrains (sauf si le propriétaire souhaite leur maintien en l'état).
4. La valorisation ou l'élimination des déchets de démolition et de démontage.

Cet arrêté prévoit également un durcissement futur de la réglementation quant au dernier point mentionné. Le tableau 2 résume l'évolution des objectifs pour le cas des rotors (pales + moyeux) :

Table 2: tableau récapitulatif de l'évolution de la réglementation concernant le démantèlement des rotors (Légifrance, Arrêté du 22 juin 2020 du Code de l'environnement 2022)

Date de mise en place de la réglementation	% en masse des rotors devant être réutilisés ou recyclés (<i>démantèlement</i>)	% en masse des rotors devant être réutilisables ou recyclables (<i>construction</i>)
Au 1er juillet 2022	Minimum 35%	Minimum 35%
Après le 1er janvier 2023 (dossier d'autorisation ou mise en service)	Minimum 35%	Minimum 35%
Après le 1er janvier 2024 (dossier d'autorisation ou mise en service)	Minimum 35%	Minimum 45%
Après le 1er janvier 2025 (dossier d'autorisation ou mise en service)	Minimum 35%	Minimum 55%

Comme vu à la section II.3., les pales constituent environ 55% en masse du rotor. Nous pouvons alors tirer deux conclusions du tableau ci-dessus :

- 1) D'une part, la réglementation en termes de démantèlement ne semble pas évoluer jusqu'en 2025. De plus, 35% en masse du rotor devant être réutilisés ou recyclés, les pales ne semblent donc pas concernées par cette obligation.

- 2) D'autre part, la réglementation s'intéresse à la construction des futures éoliennes. Comme expliqué dans la partie « économie circulaire », la prévention est effectivement la première action à considérer, et l'écoconception en fait partie. C'est seulement pour les éoliennes construites après 2025, que les pales sont prises en compte : environ 10% en masse des pales devront être « réutilisable ou recyclables ». Cela impactera donc le démantèlement prévu aux alentours des années 2045 (en prenant la durée de vie moyenne d'une éolienne égale à 20 ans).

Contrairement aux Pays-Bas, l'Autriche, l'Allemagne et la Finlande, la législation française n'interdit pas formellement l'enfouissement des pales d'éoliennes. Les pales d'éoliennes sont considérées comme Déchets Non Dangereux. Le décret n° 2021-1199 du 16 septembre 2021 relatif aux conditions d'élimination des DND dans le cadre de la loi anti-gaspillage, interdit depuis le 1er janvier 2022 la mise en décharge de toute « benne constituée, en masse, à plus de 30% de plastique » (21). Un expert du ministère de la Transition écologique a d'ailleurs souligné à l'Agence France Presse (AFP) « qu'enfouir ou mettre en décharge des pales d'éolienne deviendra même impossible à compter du 1er janvier 2022 » dans le cadre du décret précédemment cité (22). Bien qu'une pale contienne environ 30% en masse de matériau plastique (cf. partie II.3.4.), l'interrogation quant à la définition précise d'une « benne » reste en suspens et il est donc difficile de juger la réelle interdiction de mise en décharge des pales en France. C'est pourquoi le scénario de l'enfouissement restera présent dans la suite de notre analyse.

Le cadre législatif représente un levier d'action considérable pour la mise en place de nouvelles solutions afin de favoriser les actions du haut de la pyramide (prévention, réemploi, recyclage). Ces nouvelles obligations peuvent s'appliquer au produit en lui-même (l'éolienne) ou alors au mode de gestion du produit en fin de vie (fin de vie de l'éolienne). Par exemple, en obligeant les constructeurs à fabriquer des pales avec un certain pourcentage de matériau recyclable, la responsabilité est mise du côté de la conception afin de limiter les déchets en bout de chaîne. Un autre exemple mettant en avant l'évolution du cadre législatif du produit en fin de vie est la réglementation allemande qui, en interdisant l'enfouissement des éoliennes, a poussé le pays à accélérer le développement de solutions de gestion de fin de vie alternatives (23).

D'après l'ADEME, les déchets de pales peuvent être exportés vers d'autres pays membres de l'UE ou de l'OCDE. En effet, cette catégorie de déchets ne rentre a priori pas dans la convention de Bâle du 22 mars 1989 qui régit les transferts transfrontaliers de déchets. Un simple accord entre les pays importateurs et exportateurs permet alors le transfert – à l'export pour valorisation vers un pays de l'UE, l'AELE ou l'OCDE ; pour élimination vers un pays membre de l'UE ou de l'AELE. Jusqu'à la date de rédaction du rapport de l'ADEME en 2019, aucun transfert transfrontalier de déchets de pales n'avait encore été observé.

III. Gestion de la fin de vie des pales d'éoliennes - état de l'art

Aujourd'hui entre 85% et 90% de la masse totale d'une éolienne peut être recyclée (6). L'acier et le béton, représentant environ 90% du poids total d'une éolienne terrestre, sont des matériaux totalement recyclables dans les filières de recyclage existantes et bien établies. Le béton présent dans les fondations, peut être réutilisé comme matériau de génie civil pour la création de chaussée de voies de circulation ou comblements par exemple. Des innovations technologiques ainsi que l'augmentation de la durée de vie des fondations permettraient de réduire les besoins en béton (14). Le mât, qui est généralement construit en acier, peut également être totalement recyclé. Les filières de recyclage sont déjà bien établies et les propriétés du métal ne sont pas ou peu altérées après le processus de transformation. De plus, sa valorisation économique est intéressante et l'acier recyclé représente un très gros marché. Les autres matériaux tels que le cuivre et l'aluminium, bien que marginalement présent dans la structure (moins de 3% du poids total) sont également recyclables.

En ce qui concerne les pales d'éoliennes, plusieurs scénarios produiront de déchets. En effet, les exploitants peuvent avoir recours au « revamping », au « repowering » ou simplement au démantèlement complet lorsque le dispositif arrive en fin de vie. Le *revamping* consiste à changer seulement certains composants de l'éolienne afin d'améliorer sa capacité de production d'énergie. Le *repowering* quant à lui implique le renouvellement totale d'un parc, en remplaçant les aérogénérateurs par des dispositifs de puissance ou dimensions supérieures. Enfin, le démantèlement, comme son nom l'indique, implique la fin de l'exploitation du site et l'élimination total des installations (installations de production, poste de livraison, câbles électriques et remise en état du site).

Un récent rapport de l'ADEME paru en mai 2022 nous a permis de recueillir des informations détaillées (24). Dix parcs français ont été construits avant l'année 2001. Parmi eux, sept ont vu leur durée de vie se prolonger et deux ont partiellement été démantelés. Seul un d'entre eux, situé à Plouarzel, a fait l'objet d'un démantèlement complet. De plus, huit parcs n'ayant pas encore atteint vingt années d'activité ont fait l'objet d'un repowering ou d'un revamping, menant également à la création de déchets de pales. Les données ont permis de dresser le tableau suivant quant au devenir et à la gestion des déchets :

1. Les pales de trois parcs ont été revendues sur le marché de l'occasion.
2. Les pales de deux parcs ont subi un « recyclage ».
3. Les pales de trois parcs ont été revalorisées énergétiquement en Combustibles Solide de Récupération (CSR - voir partie III.4).
4. Le devenir des pales des trois parcs restants n'a pas été précisé. Nous avons ici fait l'hypothèse que ces pales ont été mises en décharge.

Bien que ce nombre semble dérisoire, la problématique est grandissante et il est nécessaire de l'anticiper. Dans cette section, les cinq catégories définies par la hiérarchie de gestion des déchets sont

revues et expliquées en détail : la prévention, le réemploi, le recyclage, la valorisation énergétique et l'élimination.

1. La prévention – déchet évité

Comme toujours, la prévention est le scénario le plus favorable en ce qui concerne la gestion des déchets. Une des stratégies principales implique de penser en amont, lors de la phase de développement du produit, c'est ce qu'on appelle l'écoconception. Malheureusement, cette approche préventive est une démarche encore relativement récente. Les pales arrivant en fin de vie dans les prochaines années et faisant l'objet du présent mémoire, n'ont a priori pas été conçues en anticipant l'étape de fin de vie.

Il est nécessaire de prendre en compte le cycle de vie complet de l'éolienne, en incluant l'étape de gestion de fin de vie. L'écoconception permet une approche globale et a pour objectifs entre autres : l'augmentation de la durée de vie du dispositif, l'orientation du choix des matériaux vers des composants plus durables et des substances moins nocives, l'optimisation des processus de fabrication afin de réduire les pertes, la réduction de la masse de l'appareil et de la quantité de matériaux utilisés etc. (25).

En vue de la projection de la RTE concernant le nombre d'éoliennes à construire sur le territoire français dans les prochaines années, la recherche en stratégies de prévention est essentielle. Elle constitue un domaine de recherche en forte croissance, mais ne permet pas de répondre à la problématique du présent mémoire, puisque applicable uniquement aux démantèlement et recyclage des pales du futur, dans une vingtaine d'année. Il n'y a pas création de déchets dans l'immédiat.

Un exemple est le projet ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch), piloté par l'institut Jules Vernes à Nantes, et en partenariat avec les acteurs industriels et de recherche Arkema, SUEZ, ENGIE, LM Wind Power, CANOE et Owens Corning, lancé en 2020 afin de tenter de répondre à la problématique de la gestion de fin de vie des pales en développant une pale 100% recyclable (26). En mars 2022, ils ont annoncé la production de la première pale en matériaux composites à base d'une matrice thermoplastique : la résine Elium (développée par Arkema). Cette pale prototype de 62m de long et produite en Espagne par LM Wind Power a vu le jour en début d'année. D'après l'IRT Jules Vernes, le composite pourra être recyclé par traitement thermique et chimique afin de séparer facilement la matrice polymère thermoplastique des fibres de verre, tous deux gardant leur propriété physique initiales et pouvant donc être réutilisés dans le même type de produit. Ceci n'a pour le moment été testé qu'en laboratoire et les recherches sont en cours pour le passage à une échelle industrielle. De plus, cette pale prototype doit encore subir de nombreux tests de fatigue et de contrainte mécanique en usage réel, face à des conditions environnementales extrêmes (27).

Un autre axe de prévention consiste à mener des actions de maintenance des aérogénérateurs plus fréquentes, en vue de l'extension de leur durée de vie. Lors d'un entretien téléphonique avec un

membre de SSE Renewables, l'entreprise nous a expliqué ne pas encore avoir été confrontée à la gestion de déchets de pales d'éolienne. En effet, grâce à leurs activités de maintenance et de contrôle récurrentes (inspections visuelles à l'aide de drones, présence de défauts sur les bords, revu de l'historique des problèmes etc.), les experts évaluent « l'état de santé » du dispositif. L'extension de la durée de vie des dispositifs semble une priorité dans le cadre de la transition vers une économie circulaire.

2. Le réemploi et la réutilisation

Le code de l'Environnement fait la distinction entre les notions de réemploi et de réutilisation. Bien que toutes deux participent à la réduction de la production des déchets, il est important d'en faire la distinction. Le réemploi consiste à utiliser de nouveau un produit pour un usage identique à celui pour lequel il avait été conçu initialement. La réutilisation permet la valorisation de ce même objet pour une fonction différente (19).

2.1. Le réemploi

Après une durée de vie d'une vingtaine d'années environ, les éoliennes sont considérées comme étant en fin de vie. En effet, bien que celles-ci aient été exposées à des conditions environnementales rudes provoquant leur usure, certaines pales sont encore en relativement bon état et peuvent techniquement être réemployées. D'après l'étude conduite par Sayer en Allemagne, les propriétés mécaniques des pales ne seraient pas ou peu dégradées, ce qui affecterait seulement de manière limitée leur performance. Pour démontrer cela, l'équipe de recherche a mené des inspections visuelles et des tests de résistance mécanique sur des pales neuves ainsi que des pales considérées en fin de vie, et en ont comparé les résultats (28).

Certaines entreprises comme P&J WINDPOWER Aps et Dutchwind, se sont spécialisées dans le reconditionnement et le marché d'éléments d'éoliennes d'occasion. Bien que peu recommandé par les manufacturiers, les pales sont remises à neuves avant d'être revendues, avec comme avantages des délais courts et des prix bas. Il est important de souligner que ce type de marché reste intéressant principalement pour des pales de petites tailles, généralement plus anciennes. En effet, le transport reste un défi majeur pour les pales de grandes tailles ainsi que pour son empreinte environnementale.

Le réemploi des pales pour une fonction similaire est fortement recommandé par la hiérarchie des déchets, comme indiqué sur la figure 9. Cependant il ne semble pas pouvoir répondre à lui seule à la problématique grandissante de gestion de flux des déchets.

2.2. La réutilisation

La réutilisation permet à l'objet de trouver une nouvelle fonctionnalité, sans étapes de transformation ou peu. Dans le cas des pales, les propriétés structurelles et mécaniques sont intéressantes. Il existe un certain nombre d'exemples de réutilisation de pales d'éoliennes, dont certains originaux. La photo 1 montre trois exemples de réutilisation. Aux Pays-Bas par exemple, des pales ont

été réutilisées dans un projet de parc pour enfants ou pour la construction de mobilier urbains. Des abris pour vélos ont également été pensés, comme dans la photo ci-dessous au Danemark.

Ce type d'application reste cependant ponctuel et local. Il est difficile à mettre en application à l'échelle industrielle.



Picture 1: exemples de réutilisation : (a) une aire de jeu pour enfants aux Pays-Bas, (b) des bancs aux Pays-Bas, (c) un abri pour vélos au Danemark

3. Le recyclage

Le recyclage des pales d'éoliennes reste un défi important, notamment à cause des matériaux composites utilisés. Ces matériaux composés d'une résine thermosable permettent d'obtenir une pale à la fois résistante, rigide et légère. La diversité de technologies et matériaux utilisés par les différents constructeurs, et qui ont évolué au cours des années, ainsi que la difficulté de séparer les différents matériaux font de la problématique du recyclage un vrai défi d'avenir.

Il existe différents types de traitements en termes de procédés et de technologies. Certaines de ces technologies sont encore au stade du développement car trop chères ou polluantes (29). Nous nous concentrons dans ce paragraphe sur les méthodes de recyclage ayant un Niveau de Maturité Technologique (Technology Readiness Level *TLR* en anglais) de niveau minimum TRL 9, afin d'envisager des actions pouvant être mises en place rapidement. Selon la définition la plus communément employée, le TRL 9 correspond à l'étape : « système réel prouvé à travers des opérations/ missions réussies » (30). Une étude réalisée par WindEurope nous a permis de sélectionner les méthodes de traitement suivantes (TRL 9) : le recyclage mécanique, la pyrolyse et le co-traitement en four à ciment.

La qualité des fibres obtenues après traitement ne sera pas la même selon la méthode de recyclage employée. En effet, la longueur, la résistance et les propriétés mécaniques diffèrent, influençant les applications de réutilisation possibles

3.1. Le recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est un procédé qui consiste en plusieurs étapes de déchetage, concassage et broyage afin d'obtenir des morceaux de quelques centimètres ou millimètres. Une première étape permet d'obtenir des morceaux d'une dizaine de centimètres, facilitant la séparation des

métaux. Les étapes de broyage suivantes permettent de contrôler la granulométrie afin de l'adapter en fonction de l'usage visé. Ces matériaux après traitement ont des propriétés mécaniques dégradées, et ne peuvent donc pas être réutilisés pour la fabrication d'une nouvelle pale d'éolienne. Ils peuvent néanmoins être réutilisés pour de nouvelles applications, comme matériaux de renforcement ou en cimenterie (voir partie « co-traitement en four à ciment ») par exemple. L'utilisation des fibres courtes comme renforcement de matériaux thermoplastique reste un challenge, car les fibres restent contaminées par la matrice polymère initiale, ce qui rend l'adhésion à la nouvelle matrice plus difficile et la qualité du matériau final moins bonne. Généralement, la concentration en fibre recyclées n'excède pas les 10% en masse pour toute nouvelle application.

La figure 9 représente une schématisation du processus de recyclage mécanique, avec comme entrée les déchets de Polymère Renforcé aux fibres de Verre (PRV). Il est important de noter, que cette méthode de traitement génère une importante perte de matière. En effet, environ 40% de déchets résiduels sont produits lors des différentes étapes de traitement.

Bien que le recyclage mécanique puisse être simplement mis en place et soit moins énergivore que les techniques de recyclage nécessitant une chaleur élevée, le produit recyclé n'est économiquement pas avantageux. En effet, le coût des fibres de verre vierges reste inférieur aux coûts de fabrication de fibres recyclées. A titre d'information, le prix des fibres de verre vierges est de 1-2 €/kg (11).

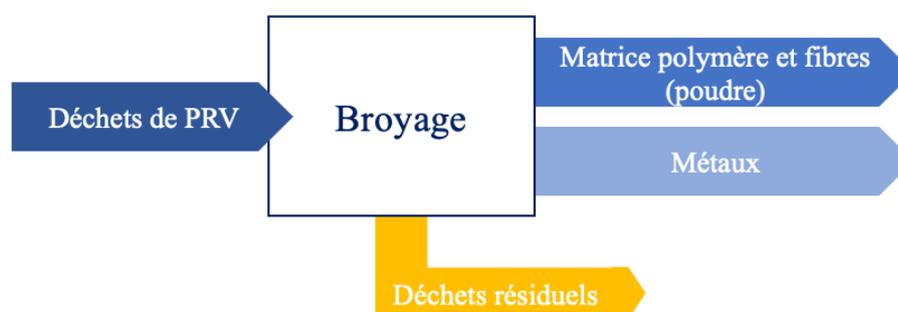
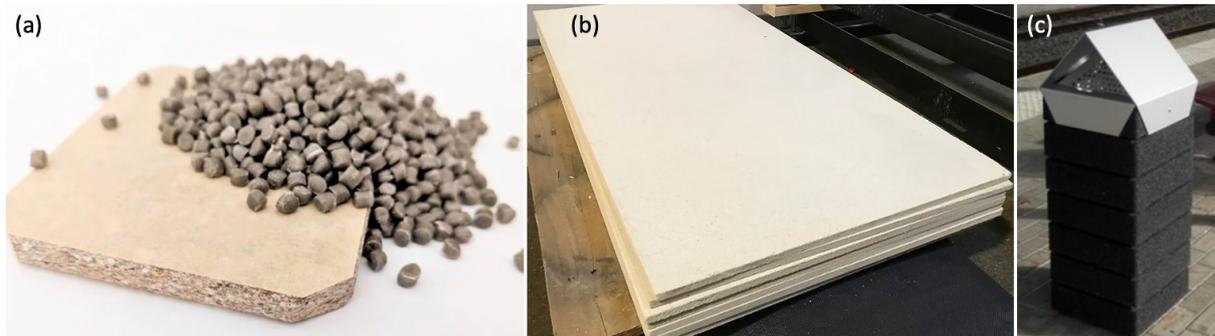


Figure 9: description du procédé de recyclage mécanique (traduction libre de WindEurope)

Plusieurs entreprises se sont néanmoins lancées et spécialisées dans le recyclage mécanique de pale d'éoliennes. Elles utilisent globalement les mêmes procédés de broyage de PRV et de réincorporation dans une nouvelle matrice polymère thermodurcissable ou thermoplastique. Aux États-Unis, Global Fiberglass Recycling (GFS) recycle des déchets composites provenant des secteurs de l'éolien, l'aérospatial et le maritime. Ils fabriquent des pastilles nommées EcoPoly qui peuvent être utilisées pour l'injection plastique de pièces automobiles par exemple ou pour la fabrication de planches pour la construction (31). L'entreprise Belge Reprocover récupère des matériaux composites à base de plastique thermodurcissable tels que les compteurs électriques, les composants automobiles et les éoliennes pour les recycler mécaniquement et les transformer en nouveaux matériaux par compactage à haute pression appelé RTS (Reprocessed Thermoset). Les objets fabriqués sont destinés aux

infrastructures ferroviaires, aux bouches d'incendie, aux cendrier/ poubelles etc (32). La photo 2 met en avant les différentes applications citées ci-dessus.



Picture 2: (a) pastilles Ecopoly produites par GFS (b) planche pour la construction produite par GFS (c) poubelle produite par Reprocover

3.2. Le recyclage thermique – la pyrolyse

La pyrolyse est un traitement thermique qui permet de récupérer les fibres. La matière organique, composée de la matrice polymère et du PVC est quant à elle dégradée. La figure 10 présente cette méthode de traitement.

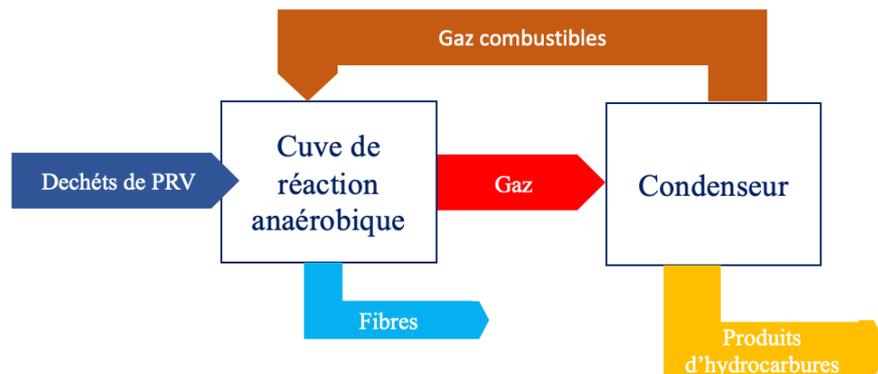
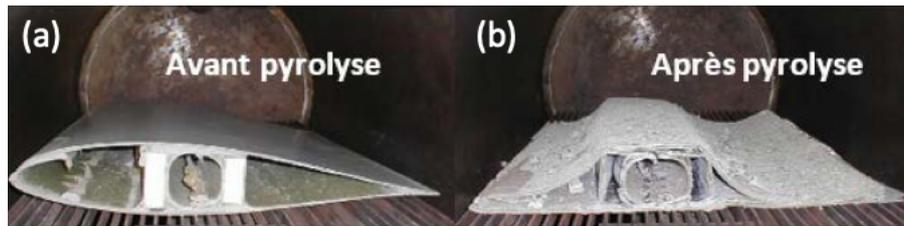


Figure 10: description du procédé de recyclage thermique (traduction libre de WindEurope)

Les pales sont chauffées dans un four à atmosphère inerte à des températures allant de 450°C à 700°C. La matière organique est alors décomposée et transformée en gaz et en huiles. Ces éléments peuvent être réutilisés ou valorisés thermiquement. Les fibres composites, qui sont-elles inertes, peuvent alors être récupérées. Cependant, les propriétés mécaniques des fibres de verre sont fortement dégradées par ce type de procédé, alors que celles des fibres de carbone restent quasiment inchangées, et restent similaires aux fibres vierges. (33) (34). La pyrolyse semble être une méthode adaptée à la valorisation de déchets composites futurs, c'est-à-dire pour les éoliennes les plus récentes, chargées en fibres de carbone. Cependant, cette méthode de recyclage reste coûteuse.

La photo 3 montre l'état d'une pale avant et après traitement thermique.



Picture 3: comparaison de l'état d'une pale (a) avant pyrolyse (b) après pyrolyse (31)

L'entreprise danoise ReFiber ApS, fondée en 2002, est spécialisée dans le recyclage des pales d'éoliennes par traitement thermique. Elle utilise la fibre de verre recyclée comme matière première dans la production de tapis d'isolation thermique.



Picture 4: tapis d'isolation en fibres de verre recyclée (31)

3.3. Le co-traitement en four à ciment

L'incinération avec récupération d'énergie et de matière en cimenterie, peut d'après la hiérarchie des déchets, être considérée comme une combinaison de valorisation énergétique et de recyclage matière.

Les pales sont transportées de leur lieu d'exploitation jusqu'à un centre de préparation de Combustible Solide de Récupération (CSR), où elles sont broyées en petits morceaux. Un CSR est un type de combustible alternatif aux combustibles fossiles, préparé à base de déchets combustibles (pneus usés, boues d'épuration, huiles usagées etc.) et qui est généralement utilisé en cimenterie pour valorisation énergétique (35).

Le mélange est ensuite envoyé en cimenterie, où il va subir un double procédé. Lors de la combustion, la partie organique permet la récupération de chaleur pour le four à ciments jusqu'à 850°C, en substitution aux énergies fossiles. Par la suite, le four à ciment monte en température grâce cette fois-ci aux énergies fossiles, jusqu'à atteindre environ 1450°C. A cette température-là, les composants des fibres de verre sont calcinés et se transforment en éléments chimiques nécessaires dans la fabrication du ciment. Cette partie minérale résiduelle n'est pas mise au rebus, mais est utilisée comme substitut aux matières premières dans la fabrication du ciment. Dans le procédé de co-traitement en four à ciment, la totalité de la matière est valorisée et permet de réduire l'empreinte carbone de la production de ciment

jusqu'à 16% (11). C'est une méthode de traitement efficace, facilement mise en œuvre, et qui permet de traiter une large quantité de déchets. Elle est décrite dans la figure 11.



Figure 11: description du procédé de recyclage par co-traitement en four à ciment (traduction libre de WindEurope)

En Allemagne, cette méthode a déjà fait ses preuves à l'échelle industrielle. L'entreprise Neocomp, située à Breme, est en partenariat avec la cimenterie Holcim à Lägerdorf depuis 2015 (36).

4. Valorisation énergétique par incinération

Dans ce mode de traitement, les pales sont d'abord envoyées en centre de préparation de CSR avant d'être acheminée en cimenterie afin d'être incinérée. Pour rappel, les CSR sont utilisés comme produit de substitution aux énergies fossiles pour récupération d'énergie thermique. Seule la partie organique de la pale participe au processus de combustion. Les résidus obtenus après combustion sont mis au rebus.

5. Élimination/ enfouissement

Bien que la mise en décharge de pales ne soit à priori pas toxique, elle a pour conséquence le gaspillage de ressources précieuses.

L'enfouissement en décharge, bien que dernier dans la pyramide des déchets, est une des méthodes les plus utilisées à l'échelle mondiale afin de se débarrasser des pales d'éoliennes en fin de vie (37). Cette technique nécessite la mise en place de lieux dédiés, et implique de facto une grande occupation des sols. En effet, les lieux initiaux prévus arrivent rapidement à saturation, obligeant les autorités à en ouvrir de nouveau un peu plus loin.

Prise aux États-Unis en janvier 2020, la photo 5 ci-dessous a fait le tour du monde. Elle montre le site d'enfouissement de Casper, dans le Wyoming, où une centaine de pales ont été enterrées ce jour-là (38). C'est notamment cette photo, qui a motivé l'écriture du présent mémoire. En effet, l'envie d'en connaître plus sur les conditions de fin de vie de ces dispositifs fournissant de l'énergie renouvelable et dite propre ont suscité notre interrogation, particulièrement sur le continent européen et plus précisément les choix de gestion de la France.



Picture 5: pales d'éoliennes sur le site d'enfouissement de Casper (35)

En France, et à titre indicatif, l'enfouissement de déchets est soumis à la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP), de 25 à 42 euros la tonne en 2020. Cette taxe est amenée à augmenter dans les années à venir, jusqu'à 65 €/t en 2025, afin de dissuader les pratiques polluantes et de privilégier les modes de traitement du haut de la pyramide de la hiérarchie des déchets. Selon la région, le coût de stockage incluant la TGAP est de 120 à 180 euros la tonne. Pour 1MW de capacité installée, la masse totale de matériaux composites devant être enfouit est de 12,8t. Les coûts totaux d'enfouissement s'élèvent donc entre 1536 à 2304 euros.

IV. Analyse de cycle de vie

Dans la partie précédente, la hiérarchie de traitement des déchets établie par le Code de l'Environnement nous a permis de passer en revue les méthodes et filières de gestion existantes, de la plus à la moins recommandée. En ce qui concerne le recyclage, nous avons sélectionné uniquement les techniques matures et déjà actives à l'échelle industrielle.

L'objectif de cette section est de déterminer la méthode de traitement avec le moins d'impact environnemental. Pour cela, trois scénarios ont été définis et modélisés. Ils seront détaillés dans cette partie. Une Analyse de Cycle de Vie (ACV) a ensuite été réalisée, afin de quantifier les impacts environnementaux de chacun des scénarios, avec pour objectif de les comparer. La méthodologie ainsi que l'unité fonctionnelle et les frontières du système seront présentées. De plus, nous avons identifié quatre catégories d'impact jugées les plus pertinentes, à savoir : le changement climatique, l'épuisement en ressources minérales, l'épuisement en ressources fossiles et la toxicité humaine cancérigène. Cette étude nous permettra de proposer des recommandations pour le traitement des futurs flux de pales d'éoliennes en fin de vie en France. Des suggestions d'amélioration seront également exposées.

1. Définition et cadre méthodologique

Les normes ISO 14040/44 définissent l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) comme une « *compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie* » (39). Cette méthode permet de quantifier les effets sur l'environnement d'un produit ou d'un service en tenant compte des différentes étapes de leur cycle de vie : l'extraction des matières premières, la production, la distribution, l'utilisation et la gestion de fin de vie. Elle permet une évaluation globale et multicritère des impacts possibles, grâce à l'inventaire des flux entrants (tels que les ressources en eau, en pétrole, en métaux, etc.) et sortants (tels que les émissions, les déchets, les énergies etc.), ainsi que leurs interactions. Enfin, l'outil ACV est normalisé et largement utilisé au sein de la communauté scientifique internationale, permettant une harmonisation de la méthodologie d'évaluation et une certaine fiabilité des résultats obtenus (40).

Dans le cadre du présent mémoire, nous allons uniquement nous concentrer sur la partie « fin de vie » en réalisant une ACV dite « de la porte à la tombe ». En effet, l'objectif étant de comparer la performance environnementale de différents scénarios de traitement en fin de vie des pales d'éoliennes, la partie en amont (de l'extraction des matières premières à la phase d'usage) reste la même et est donc exclue de la présente analyse. Cette méthode est considérée comme un instrument solide de comparaison et nous permettra de faire des suggestions sur la meilleure technique à adopter. L'ACV est un outil d'aide à la décision, dont l'une des applications peut être d'orienter les pouvoirs publics vers le choix de la filière de valorisation la moins impactante.

Il existe plusieurs approches méthodologiques d'attribution des impacts et des bénéfices environnementaux à un produit en fin de vie, qui permettent de répondre à différents objectifs. Deux grandes familles peuvent être distinguées : l'approche attributionnelle et l'approche conséquentielle. La première permet d'étudier les impacts environnementaux d'un produit de manière statique dans le temps et d'identifier les étapes les plus polluantes, alors que la deuxième sert à analyser les conséquences environnementales d'un cycle de vie affecté par un changement (41).

Dans la méthode cut-off, appartenant à l'approche attributionnelle, aucun crédit d'impact environnemental n'est attribué au produit recyclé en fin de vie, même s'il permet la réduction de l'utilisation de matière vierge dans le cycle de vie de la matière recyclée. La fraction recyclée est donc exclue des frontières du système alors que les impacts liés à la partie réellement éliminée en fin de vie est prise en compte (42). Par exemple, le métal collecté afin d'être recyclé ne comptabilisera aucun impact environnemental positif pour la gestion de sa fin de vie. Les impacts négatifs liés au processus de recyclage seront pris en compte dans le cycle de vie du nouveau produit utilisant ce matériau recyclé. De la même manière, les conséquences bénéfiques liées à la valorisation énergétique ne sont pas considérées.

Par extension des frontières, les potentiels bénéfices environnementaux engendrés par le recyclage ou la valorisation énergétique sont comptabilisés dans la mesure de performance environnementale. Dans cette approche, la substitution de ressources fossiles pour la production d'énergie ou l'évitement de l'extraction et production de matière vierge sont positifs pour l'environnement et alloués à l'étape de fin de vie (42). En reprenant l'exemple précédent, les impacts liés à la production de métal vierge évitée sont pris en compte dans le bilan de l'étape de fin de vie du matériau initial. Ces bénéfices apparaissent donc comme des nombres négatifs dans la suite de l'analyse. Plus le crédit d'impact est négatif, plus les bénéfices environnementaux sont grands.

Pour notre ACV, nous avons d'abord choisi d'utiliser la méthode cut-off afin de quantifier et visualiser les impacts réels des différents scénarios. Puis, afin de prendre en compte les bénéfices dus aux substitutions et au recyclage, les crédits d'impact environnementaux ont été intégrés à notre évaluation. Nous comparons les scénarios pour chacune de ces approches.

Le programme SimaPro version 9.3.0.3 a été utilisé pour notre analyse. Fort d'une base de données fiables, SimaPro est de plus en plus utilisé aussi bien dans le domaine de la recherche que par les entreprises qui souhaitent évaluer l'empreinte environnementale de leurs produits (43). Nous avons fait le choix d'utiliser la base de données EcoInvent, publiée pour la première fois en 2003, et largement employée à travers le monde. La version 3.5 offre une vaste étendue de données, régulièrement mise à jour, aussi bien sur les processus que sur les matériaux et produits (44).

2. Objectifs de l'étude et choix des impacts environnementaux

L'objectif de cette étude est d'évaluer les bénéfices et inconvénients environnementaux pour différents scénarios de gestion de fin de vie de pales d'éoliennes. La quantification des impacts environnementaux nous permettra de comparer les scénarios, d'évaluer la meilleure technique de gestion probable et de proposer des recommandations quant à la stratégie à adopter pour les flux croissants de déchets de pales d'éoliennes. La présente analyse rend uniquement compte de l'aspect environnemental. Cependant, les dimensions sociales et économiques sont essentielles dans l'élaboration d'une stratégie. Des études plus globales et prenant en compte la totalité des dimensions environnementales, sociales et économiques seront nécessaires dans les années à venir.

La méthode ReCiPe 2016 (H), largement utilisée en Europe, a été choisie pour le calcul des impacts environnementaux. Celle-ci fait la distinction entre deux catégories d'impact : à mi-parcours (*midpoint*) ou à la finalité (*endpoint*). La catégorie *midpoint* englobe une série d'indicateurs d'impact, au nombre de 18, comme le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone, l'épuisement des ressources en eau etc. La catégorie *endpoint* regroupe par pondération la totalité des impacts *midpoint* en trois domaines de protection : le risque pour la santé humaine, la qualité des écosystèmes et la rareté des ressources. Elle facilite la compréhension car elle diminue le nombre d'indicateurs. Cependant, la validité scientifique des indicateurs de dommages *endpoint* est moins reconnue, puisqu'elle représente une agrégation d'indicateurs individuels (45). Dans le cadre de ce mémoire, et bien que les deux catégories d'impact soient complémentaires, nous avons fait le choix d'utiliser quatre indicateurs de la catégorie *midpoint*. Les indicateurs *midpoints* ont une relation directe avec les flux environnementaux et offrent des informations plus précises par rapport aux indicateurs *endpoint*. Au vu de notre problématique de la gestion des pales en fin de vie, nous avons choisi les indicateurs suivants : le changement climatique, l'épuisement des ressources minérales, l'épuisement des ressources fossiles et la toxicité humaine cancérigène. Il sera néanmoins important d'être attentif aux transferts d'impact. En effet, un scénario peut avoir moins d'incidence sur un critère donné, mais en aura d'avantage sur un autre.

Le réchauffement climatique est probablement l'indicateur le plus connu et s'exprime en kg de CO₂ équivalent. Ceci permet de convertir en une unité commune les pouvoirs de réchauffement des différents gaz à effet de serre. L'épuisement des ressources minérales s'exprime en kg de cuivre équivalent et englobe la perte des ressources minérales non renouvelables, telles que le cuivre, les terres rares, le sable, etc. L'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables, telles que le charbon, le gaz le pétrole, etc. s'exprime en kg de pétrole équivalent. Les deux indicateurs cités précédemment évoluent dans un contexte où la Terre est un système fermé, dont les ressources sont limitées. Enfin, l'indicateur de toxicité cancérigène sur la santé humaine permet de rendre compte de l'impact sur

l'homme de la contamination de l'environnement, par inhalation ou ingestion de substances toxiques par exemple. Il est exprimé en kilogramme de dichlorobenzène (kg 1,4-DCB).

3. Cadre analytique : unité fonctionnelle et frontières du système

3.1. Unité fonctionnelle

Le choix de l'Unité Fonctionnelle (UF) est fondamental lors de la réalisation d'une ACV. Cette unité sert de référentiel commun pour l'inventaire des différents flux et le calcul des impacts environnementaux. Elle permettra de comparer les impacts des différents scénarios de gestion de fin de vie sur une unité commune et rendra la communication des résultats plus simple.

Pour rappel, nous avons défini dans la première partie (tableau 1), que la masse moyenne de matériaux utilisés dans les pales est de 12,8 tonnes (pour une puissance de 1 MW), soit : 3840 kg de matrice polymère, 7170 kg de fibres de verre, 1150 kg de mousses et adhésifs, et enfin 640 kg de métaux. Les impacts environnementaux seront donc calculés pour un Mégawatt installé. L'Unité Fonctionnelle correspond à :

« La masse moyenne de matériaux utilisés dans les pales (12,8t) pour 1MW de capacité installée »

3.2. Frontières du système : référentiel géographique et temporel

Afin de définir notre référentiel géographique d'étude, nous avons décidé de nous concentrer sur la région française avec la plus grande capacité installée. C'est la région des Hauts-de-France qui est actuellement en tête, avec environ 5,2 GW. Nous faisons l'hypothèse que celle-ci sera amenée à voir un grand nombre de ses parcs vieillir et devra faire face à la problématique de gestion de fin de vie dans les prochaines années.

Le rapport de l'ADEME nous a conforté dans notre choix. La publication de la cartographie du gisement annuel de déchets composites issus de la filière éolienne à l'horizon 2030, montre une concentration de déchets la plus importante dans le nord de la France (figure 12). Le calcul est basé sur une moyenne de trois années consécutives 2029-2031, et prend en compte une durée de vie moyenne de vingt ans.

Nous considérons un parc éolien à démanteler situé au centre de la région Hauts-de-France, à Péronne (commune du département de la Somme). Afin d'évaluer les distances entre les différents sites de traitement, les trajets répertoriés ont été estimés grâce à l'outil Google Maps.

De plus, nous prendrons comme limite temporelle de notre système, le moment à partir duquel les pales sont démontées sur le site d'exploitation et déjà coupées en morceaux. Un outil développé par Veolia permet de scier les pales sur place et évite aux poussières probablement toxiques de se répandre dans la nature pendant cette étape (46). La découpe des pales permettra ensuite leur transport par camion

vers les différents sites de traitement. L'étape de collecte, qui est commune à nos différents scénarios, précède les trois options de traitement considérées dans cette étude.

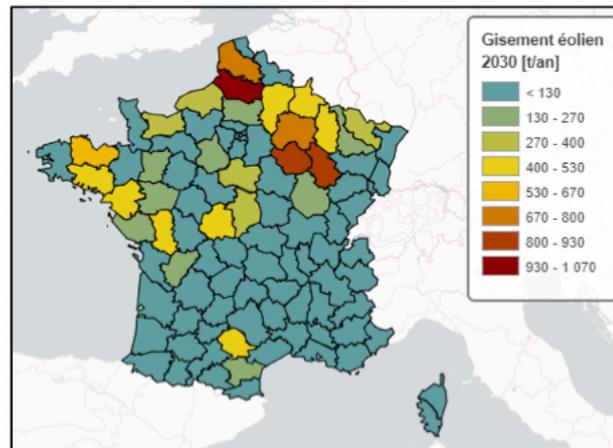


Figure 12: gisement annuel de déchets composites issus de la filière éolienne en 2030 (ADEME)

4. Description des scénarios

Après revue de la littérature des différentes méthodes de gestion de fin de vie décrites dans la troisième partie, nous avons retenu les trois scénarios suivants : l'enfouissement, l'incinération avec valorisation énergétique et le co-traitement en four à ciment (incinération avec récupération énergétique et matériaux de substitution en cimenterie). Les autres ont été écartés de notre ACV.

L'enfouissement et l'incinération sont les deux méthodes de traitement les plus communément pratiquées en Europe (37). Bien que la législation ait durci les normes de mise en décharge au premier trimestre 2022, nous n'avons pas exclu de notre recherche l'enfouissement en France. Il nous a donc paru évident d'étudier les impacts environnementaux de ces deux méthodes. De plus, l'incinération pour récupération énergétique et revalorisation des matériaux dans le ciment est une technique déjà utilisée à l'échelle industrielle en Allemagne. Nous avons choisi cette solution existante pour notre troisième scénario, puisqu'elle pourrait être appliquée en France.

Les autres techniques répertoriées dans notre état de l'art ont été écartées pour les raisons suivantes :

- D'une part, les méthodes de réemploi et de réutilisation ne mènent pas à la création directe de déchets, et ne rentrent donc pas dans le cadre de cette analyse. Le réemploi, pour le mobilier urbain par exemple, paraît être une bonne solution à l'échelle locale, mais ne semble pas viable pour faire face aux flux nationaux de déchets attendu dans les prochaines années. La réutilisation quant à elle permet l'extension de la durée de vie des différents composants de l'aérogénérateur et évite l'extraction de nouvelles matières premières ainsi que les impacts environnementaux de la chaîne de production. Cette méthode mènera in fine à la même problématique de gestion des déchets, mais dans un temps plus lointain et peut-être dans des pays avec des normes environnementales et de recyclage différentes et moins restrictives.

- D'autre part, les techniques de recyclage comme le traitement mécanique, chimique et thermochimique ne sont pour le moment qu'en phase de développement ou économiquement non favorables (16). Elles ne sont donc pas reprises dans la présente analyse.

Les trois filières choisies pour notre ACV sont : l'enfouissement, l'incinération avec valorisation énergétique et le co-traitement en four à ciment. Pour les deux premiers scénarios, nous avons fait l'hypothèse que les déchets sont traités en circuits courts. Les centres de traitement pour chacune des filières mises en jeu ont tous été pris au plus proche du site de gisement des déchets.

4.1.Scénario 1 : l'enfouissement

L'enfouissement des pales en décharge est le scénario le moins recommandé par la hiérarchie des déchets (47). Il constitue une perte totale de matière et aucune valorisation énergétique n'est permise dans le type de décharge utilisée. Pour rappel, les pales d'éoliennes sont considérées comme Déchets Non Dangereux (DND). A ce titre, leur traitement se fait de manière générale dans une des nombreuses Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND) sur le territoire. Grâce à la cartographie française des ISDND, nous avons pu localiser le centre de traitement le plus proche de la commune de Péronne (48). Dans le cadre de ce scénario, les pales coupées en morceaux sont transportées par camion depuis le site d'exploitation jusqu'à l'ISDND de Nurlu, qui se trouve à une dizaine de kilomètres de Péronne. La figure 13 présente le scénario 1.

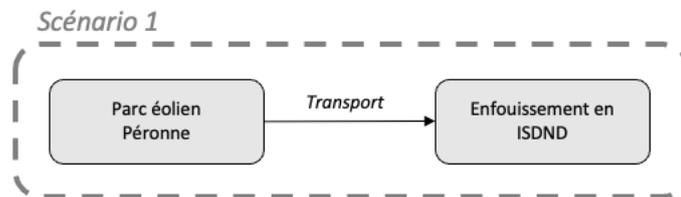


Figure 13: description du scénario 1

4.2.Scénario 2 : l'incinération avec valorisation énergétique et recyclage du métal

L'incinération avec valorisation énergétique représente une des solutions privilégiées à l'heure actuelle. Comme indiqué dans la partie I.3., 27% des pales ayant été démantelées à ce jour en France, ont été valorisées en Combustible Solide de Récupération (CSR).

Dans ce scénario, décrit dans la figure 14, nous supposons que les déchets sont transportés jusqu'au site de préparation de CSR le plus proche. La cartographie de ces sites sur le territoire français nous a permis d'identifier l'Unité de Tri, Valorisation, Matière et Énergie (TVME) à Evin Malmaison (62) comme étant le plus proche de la commune de Péronne, puisqu'il se trouve à 68km de cette dernière (24).

A leurs arrivés en centre de traitement, les déchets de pales mesurent encore une dizaine de mètres. Les morceaux sont alors déchiquetés afin d'être réduits en déchets de quelques centimètres. Grace à un

équipement muni d'un aimant, les matières métalliques sont séparées du reste, laissant un mélange de matrice et de fibres de verre concassées. Ce mélange de déchets combustibles va être utilisé comme CSR. Nous faisons l'hypothèse que cette poudre ne subit aucun autre traitement, et qu'elle est transportée telle quelle jusqu'au lieu d'incinération.

Les métaux récupérés sont eux dirigés vers un site de traitement afin d'être recyclés. L'acier est certainement le métal le plus utilisé à travers le monde, présent dans un grand nombre de nos équipements du quotidien (voitures, trains, ponts, machines industrielles etc.). L'acier est 100% recyclable. En Europe, environ 90% de ce métal en fin de vie est récupéré et recyclé afin d'être réintroduit dans de nouveaux produits (49). Afin de simplifier l'analyse, nous considérons ici que 100% des métaux présents dans les déchets de pales d'éoliennes ont pu être collectés et recyclés. Pour 1 kg de métal recyclé, la production de 1 kg d'acier vierge est évitée.

L'exutoire majoritaire pour les CSR sont les cimenteries, et plus marginalement les chaudières des collectivités et industries locales. De la même manière que pour les ISDND, la cartographie des cimenteries françaises nous a permis de déterminer la plus proche du lieu de fabrication de CSR. Il est intéressant de noter que d'après les informations consultables de TVME d'Evin Malmaison, les CSR sont utilisés « dans les fours des cimenteries régionales ou à proximité en Europe » (50). L'impact du transport ne sera pas le même selon le lieu final d'incinération. Dans notre scénario, la cimenterie la plus proche est celle de Lumbres Eqiom qui se situe à environ 86 kilomètres du site d'Evin Malmaison.

Les CSR sont utilisés en substitution aux combustibles fossiles pour valorisation énergétique. Seule la partie organique participe à la combustion. Dans notre étude, nous avons considéré le charbon comme étant le combustible fossile substitué, car il est couramment utilisé en cimenterie (51).

Les déchets résiduels après combustion, provenant principalement de la calcination des fibres de verre, sont mis au rebus. Une fois encore, la cartographie des ISDND nous a permis d'identifier le site le plus proche de la cimenterie : l'installation de stockage de Bimont, située à une trentaine de kilomètres.

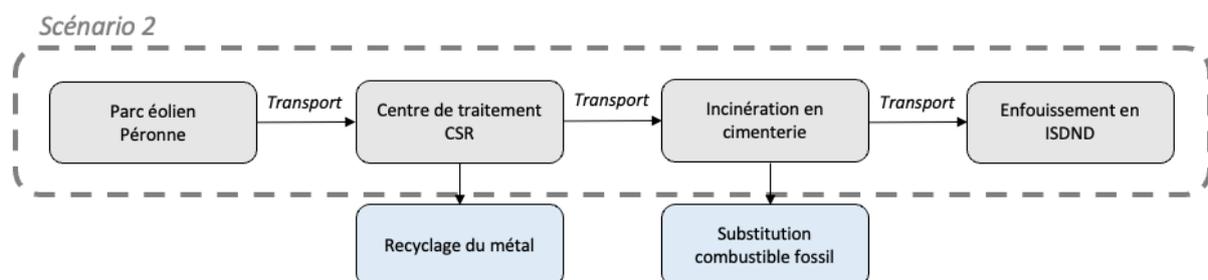


Figure 14: description du scénario 2

Ce scénario bénéficie du crédit environnemental de la substitution de combustibles fossiles, ainsi que du recyclage des matériaux métalliques.

4.3.Scénario 3 : le co-traitement en four à ciment

Nos recherches ont mis en évidence l'avancée allemande dans ce type de pratique. L'usine Neocomp située à Brème utilise cette méthode à l'échelle industrielle depuis 2015 (36). Nous avons émis le scénario hypothétique dans lequel les déchets de pales sont acheminés jusqu'à cette usine pour traitement. Elles poursuivent ensuite le processus standard d'une pale d'éolienne allemande.

D'après la hiérarchie des déchets, le co-traitement peut être considéré à la fois comme valorisation énergétique et comme recyclage matière. Ce scénario implique plusieurs étapes (figure 15) :

1. Le transport des déchets d'éoliennes depuis le site d'exploitation jusqu'à l'usine de broyage (de Péronne à Brème dans notre scénario).
2. Le déchiquetage mécanique des pales pour la création de CSR et le recyclage de l'acier.
3. Le transport des CSR vers la cimenterie (de Brème à Lägerdorf).
4. L'utilisation du broyat comme matière première pour la combustion, en remplacement du charbon (substitution d'énergie fossile).
5. L'utilisation des résidus minéraux comme substituts aux matières premières en cimenterie.

De la même manière que dans le scénario 2, l'acier est recyclé et les CSR sont utilisés en substitution aux énergies fossiles. La partie résiduelle des fibres de verre après traitement est cette fois valorisée comme substitut à certains éléments chimiques du ciment Portland. En effet, pendant le processus de combustion, la fibre de verre se calcifie et sa composition se transforme en oxydes d'aluminium ($Al_2O_3 + Fe_2O_2$), oxyde de silice (SiO_2) et oxyde de calcium (CaO), tous trois nécessaires à la fabrication du ciment.

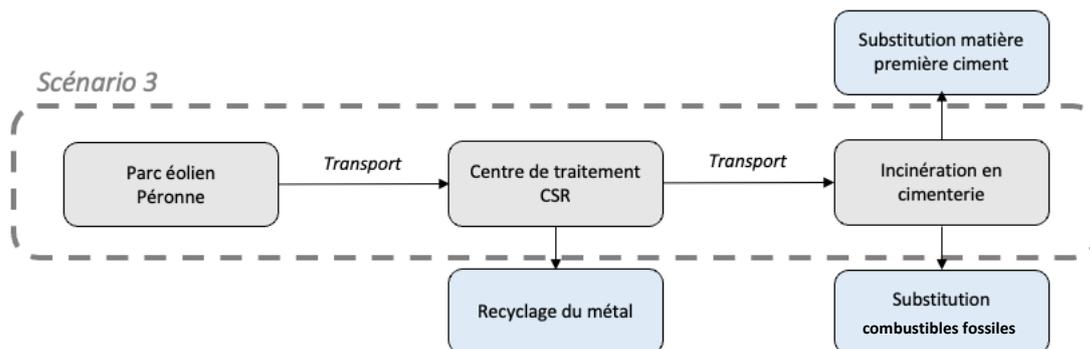


Figure 15: description du scénario 3

Ce scénario bénéficie donc du crédit environnemental de la substitution de combustibles fossiles, du recyclage des matériaux métalliques ainsi que de la substitution d'éléments chimiques pour la production du ciment.

5. Collecte des données pour les différents scénarios

Cette section a pour objectif de présenter la méthodologie suivie pour la collecte des données de l'ACV : les phases de transport, les procédés de transformation, ainsi que les différentes substitutions.

5.1.Phase de transport

Le tableau 3 résume pour chacun des scénarios les trajets effectués entre les différents sites de traitement. Nous considérons que le transport est réalisé par camion, ayant une capacité de charge allant de 7,5 à 16 tonnes de matière. Notre unité fonctionnelle correspond à une masse totale de 12,8 tonnes, donc un seul camion est nécessaire afin d'assurer le transport. Cette hypothèse est appliquée pour tous les transports dans chacun des scénarios.

Chaque trajet est défini par son point de départ et d'arrivée, et les distances ont été calculées grâce à l'outil Google Maps. Le camion utilisé suit la norme européenne d'émission EURO 6, qui vise à réduire les émissions d'échappement (52).

Table 3: distances entre les sites de traitement pour les différents scénarios

Scénario	Point de départ	Point d'arrivée	Distance (km)
1	Péronne	ISDND Nurlu	11
2	Péronne	TVME Evin Malmaison	68
2	TVME Evin Malmaison	Cimenterie Lumbres Eqiom	86
2	Cimenterie Lumbres Eqiom	ISDND Bimont	28
3	Péronne	Breme	651
3	Breme	Lägerdorf	163

5.2.Procédé de transformation : le broyage

Le scénario 1 ne nécessite pas de procédé de transformation, puisque les déchets sont directement enfouis.

Pour les scénarios 2 et 3, les informations sur le dispositif de broyage utilisé ont été récoltées par interview auprès de Néocomp dans le cadre de la recherche d'Angela J. Nagle (17). Nous partons du principe que le type de machine ainsi que le procédé de broyage en lui-même sont identiques pour ces deux scénarios. La seule différence dans le calcul des impacts environnementaux est le mix énergétique utilisé pour le fonctionnement des machines. Le mix énergétique français a été utilisé pour le scénario 2, alors que le mix énergétique allemand l'a été pour le scénario 3.

La demande d'énergie moyenne du dispositif de broyage est estimée à environ 0,17 MJ/kg. Dans le cadre de notre étude, 12800 kg de déchets de pales d'éoliennes subissent ce traitement mécanique. Nous pouvons alors estimer l'énergie totale nécessaire au traitement de cette quantité de matière :

$$\dot{Energie\ totale} = 12800 * 0,17 * 0,28 = 610\ kWh \quad , \text{ avec } 1MJ = 0,28\ kWh$$

Pour rappel, nous considérons que les CSR ne subissent aucun traitement additionnel, et qu'ils sont transportés jusqu'en cimenterie tels quels.

5.3.Substitution de combustibles fossiles

Dans les scénarios 2 et 3 la combustion de la partie organique des CSR permet de remplacer une certaine quantité de combustibles fossiles, à savoir le charbon dans notre analyse. En effet, ce sont uniquement les combustions de la matrice polymère thermodurcissable ainsi que des mousses et adhésifs en PVC qui vont libérer de la chaleur. Le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) correspond à l'énergie thermique libérée par la combustion d'un kilogramme de combustible, sans prendre en compte l'énergie de vaporisation de l'eau. A titre d'information et d'après les la base de données EcoInvent, les PCI de la matrice époxy et celui du PVC sont égaux respectivement à 30,7 MJ/kg et 21,5 MJ/kg.

Dans notre étude, nous avons considéré qu'un kilogramme de matière polymère évite la combustion d'un kilogramme de charbon (substitution 1 :1). Par conséquent, la combustion de 4990 kg de charbon sera évitée.

5.4.Substitution de matières premières en cimenterie

Dans le scénario 3, les résidus obtenus après calcination des fibres de verre sont composés d'oxydes d'aluminium, d'oxydes de silice et d'oxydes de calcium. Ces cendres sont utilisées en substitution aux matières premières dans la production du ciment.

Cependant, la proportion des oxydes contenus dans les résidus ne correspond pas à la quantité nécessaire à la fabrication du ciment. Il faut ajouter les résidus en certaines proportions afin d'assurer les normes et propriétés mécaniques du ciment. D'après l'étude menée par Angela J. Nagle, 10% des matières premières vierges peuvent être remplacées par les résidus obtenus après calcination (17). Nous avons fait le choix d'utiliser cette même hypothèse dans notre analyse.

6. Résultats/ Discussion

La figure 16 permet de comparer les différents scénarios pour les quatre catégories d'impact choisies, à savoir : le changement climatique, l'épuisement des ressources minérales et fossiles et la toxicité humaine cancérigène. Pour rappel, chacun des scénarios représente une méthode de gestion des déchets de pales d'éoliennes d'une masse de 12,8 tonnes. Le scénario 1 correspond à l'enfouissement, le scénario 2 à l'incinération avec valorisation énergétique et le scénario 3 au co-traitement en four à ciment. Il est important de souligner que les résultats présentés dans cette première partie ont été calculés dans le cadre d'une approche cut-off, et ne prennent en compte aucun impact bénéfique lié aux substitutions matières ou au recyclage.

Pour chacune des catégories le scénario 1 semble être de loin le moins impactant.

Pour les impacts sur le changement climatique et l'épuisement des ressources minérales, les scénarios 2 et 3 sont du même ordre de grandeur, et environ 20 fois supérieur au scénario 1. Cela n'est pas surprenant puisque la partie organique des pales est principalement produite à partir de matériaux issus de la chimie du pétrole et son incinération émet beaucoup de gaz à effets de serre.

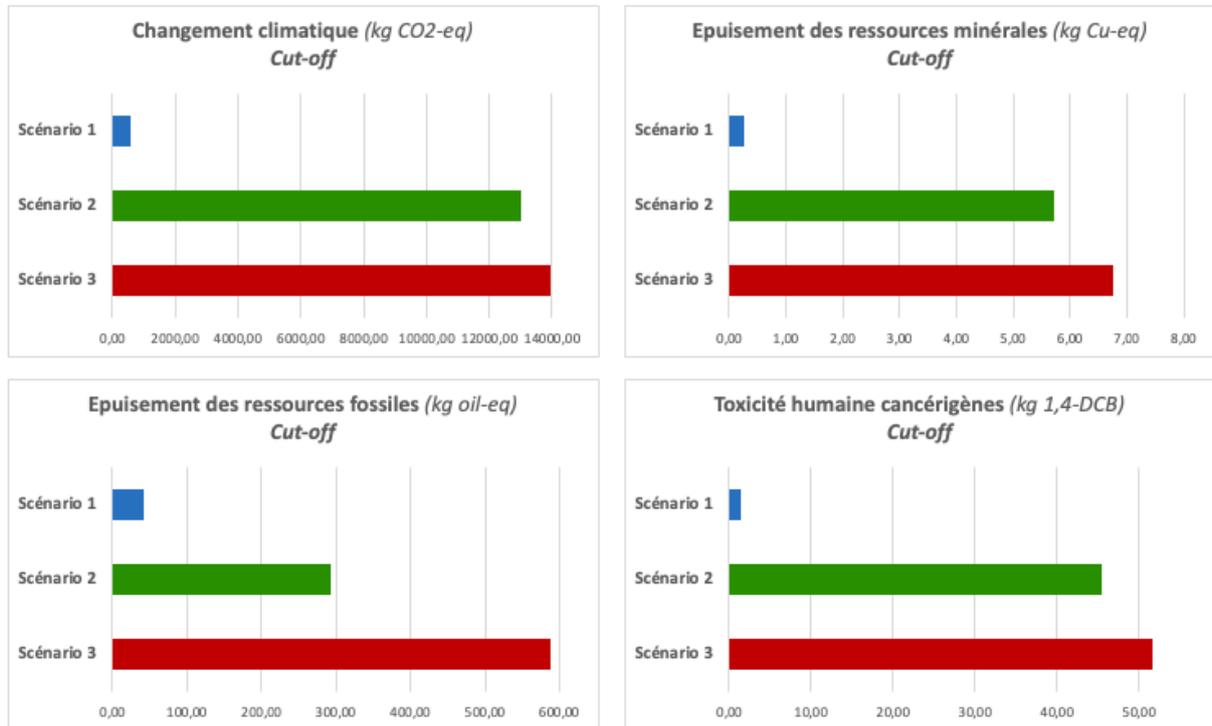


Figure 16: comparaison des impacts environnementaux pour les différents scénarios – approche cut off.

En ce qui concerne l'impact sur la toxicité humaine cancérigène, les scénarios 2 et 3 sont 30 fois plus impactants. Enfin, pour l'épuisement des ressources fossiles, l'impact des différents scénarios est assez marqué. Le scénario 3 a des impacts deux fois plus élevés que le scénario 2 et dix fois plus que le scénario 1. Ce résultat est sûrement dû aux grandes distances de transport entre le parc éolien où les déchets sont récupérés et les sites de traitement, qui dans le cas du scénario 3 se trouvent en Allemagne. Le scénario 3 semble ainsi être le moins recommandé pour ces catégories d'impact.

Après cette vue générale, nous allons étudier plus en détails les différents contributeurs aux impacts environnementaux pour chacun des scénarios.

6.1.Scénario 1 : l'enfouissement

L'ACV réalisée pour le scénario 1 – enfouissement de 12,8 tonnes de déchets de pales d'éoliennes – en tenant comptes des quatre catégories d'impact, permet d'estimer que ce type de gestion de fin de vie émet environ 580 kg de CO₂ eq., est responsable de 0,26 kg de Cu eq. d'épuisement de ressources minérales et de 42,05 kg de pétrole eq. d'épuisement des ressources fossiles, et enfin de l'émission de 1,50 kg 1,4-DCB de substances toxiques pour la santé humaine (tableau 4). Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Table 4: scénario 1 – enfouissement - résultats de l'ACV pour les quatre catégories d'impact analysées.

Catégories d'impacts	Total	Enfouissement Matrice Epoxy	Enfouissement Fibres de verre	Enfouissement PVC	Enfouissement Métaux	Transport
Changement climatique (kg CO ₂ -eq)	579,98	440,26	31,81	92,35	3,34	12,22
Epuisement des ressources minérales (kg Cu-eq)	0,26	0,14	0,05	0,04	0,01	0,02
Epuisement des ressources fossiles (kg oil-eq)	42,05	19,50	10,11	5,74	2,16	4,54
Toxicité humaine cancérigènes (kg 1,4-DCB)	1,50	0,84	0,29	0,22	0,04	0,11

Comme représenté sur la figure 17, l'enfouissement des matériaux représente 90% ou plus des impacts environnementaux pour chacune des catégories. La faible contribution du transport est sans surprise, puisque la distance entre la collecte des déchets et le lieu de traitement en ISDND est d'une dizaine de kilomètres. La matrice polymère therm durcissable a le plus d'impact environnemental dans ce scénario. En effet, il est notamment responsable de 75% des impacts sur le changement climatique, d'environ 55% de l'épuisement des ressources minérales et de l'émission de substances cancérigènes, et enfin d'un peu moins de 50% de l'épuisement des ressources fossiles.

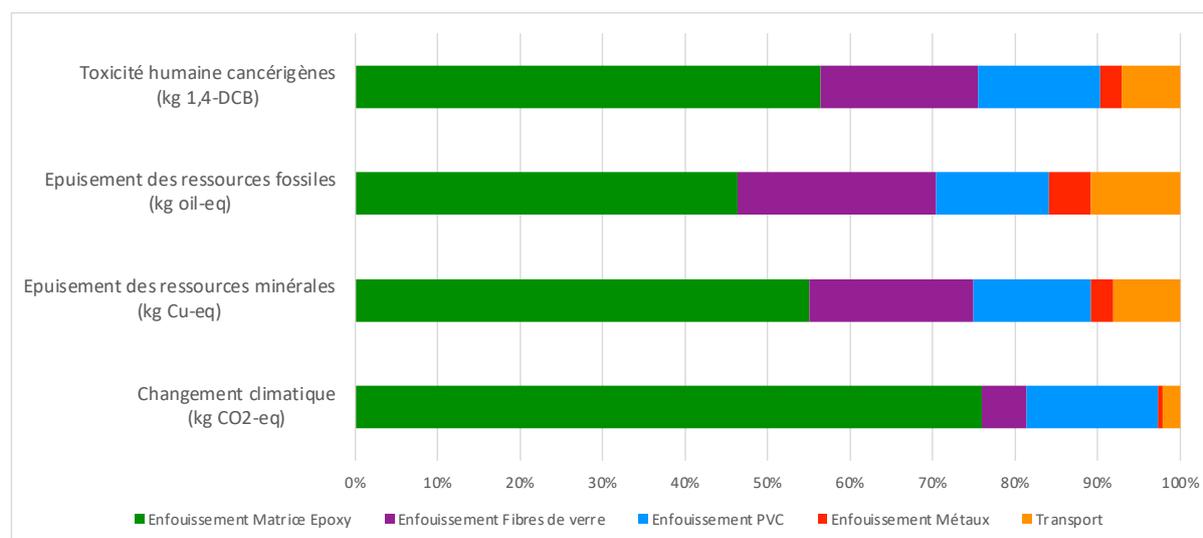


Figure 17: scénario 1 – enfouissement - détails des contributions aux quatre catégories d'impact

La grande contribution de la matrice polymère aux impacts s'explique probablement, d'une part par son pourcentage massique élevé de 30% (équivalent à 3840 kg), d'autre part par sa composition plastique. Le PVC est en plus faible quantité, mais contribue de manière non négligeable aux impacts environnementaux. Enfin, bien que présentes en majorité dans notre unité fonctionnelle avec environ 7170 kg, les fibres de verre contribuent relativement peu aux impacts environnementaux comparé aux autres matériaux (environ 15% pour chaque catégorie). Cela est sûrement dû à la nature inerte de ce matériau.

6.2.Scénario 2 : l’incinération avec valorisation énergétique

L’ACV réalisée dans le cadre du scénario 2 permet de quantifier les impacts environnementaux de l’incinération avec valorisation énergétique de 12,8 tonnes de déchets de pales d’éoliennes. Les impacts calculés pour les quatre catégories sont beaucoup plus élevés que pour l’enfouissement. On peut notamment observer que ce type de gestion émet environ 13 tonnes de CO₂ eq., est responsable de l’épuisement de 5,7 kg de Cu eq. de ressources minérales et de 293,61 kg de pétrole eq. de ressources fossiles, et enfin de l’émission de 45,37 kg 1,4-DCB de substances toxiques pour la santé humaine (tableau 5).

Comme expliqué précédemment, nous avons utilisé la méthode cut-off pour le choix des frontières du systèmes. Ainsi, les crédits d’impact environnementaux liés au recyclage de l’acier et à la substitution d’énergie fossile ne sont pas ici pris en compte. C’est pour cela que le traitement du métal ne produit pas d’impact : dans la méthode cut-off, les impacts liés au procédé de recyclage du métal sont directement comptabilisés pour le produit recyclé (mais n’auront pas les impacts de la production primaire de l’acier).

Table 5: scénario 2 – incinération - résultats de l’ACV pour les quatre catégories d’impact analysées

Catégories d’impacts	Total	Broyage	Incineration Matrice Epoxy	Incineration Fibres de verre	Incineration PVC	Traitement Métaux	Transports
Changement climatique (kg CO ₂ -eq)	13016,05	52,65	10353,56	72,33	2337,94	0,00	199,58
Epuisement des ressources minérales (kg Cu-eq)	5,70	0,65	2,62	0,83	1,31	0,00	0,30
Epuisement des ressources fossiles (kg oil-eq)	293,61	14,19	101,04	38,33	66,50	0,00	73,54
Toxicité humaine cancérigènes (kg 1,4-DCB)	45,37	2,57	23,99	4,81	12,50	0,00	1,50

L’impact des transports est, en valeur absolue, plus élevé pour le second scénario que pour le premier. Le transport représente un quart des impacts pour l’épuisement des ressources fossiles. Cela paraît cohérent avec le fait que ce scénario implique trois transports entre les différents sites de traitement, d’une distance totale de 182 km. L’incinération des matériaux, et notamment des matières plastiques, reste l’étape la plus impactante pour chacune des catégories. De plus, le broyage joue lui aussi un rôle non négligeable, avec notamment plus de 10% de contribution à l’épuisement des ressources minérales (figure 18).

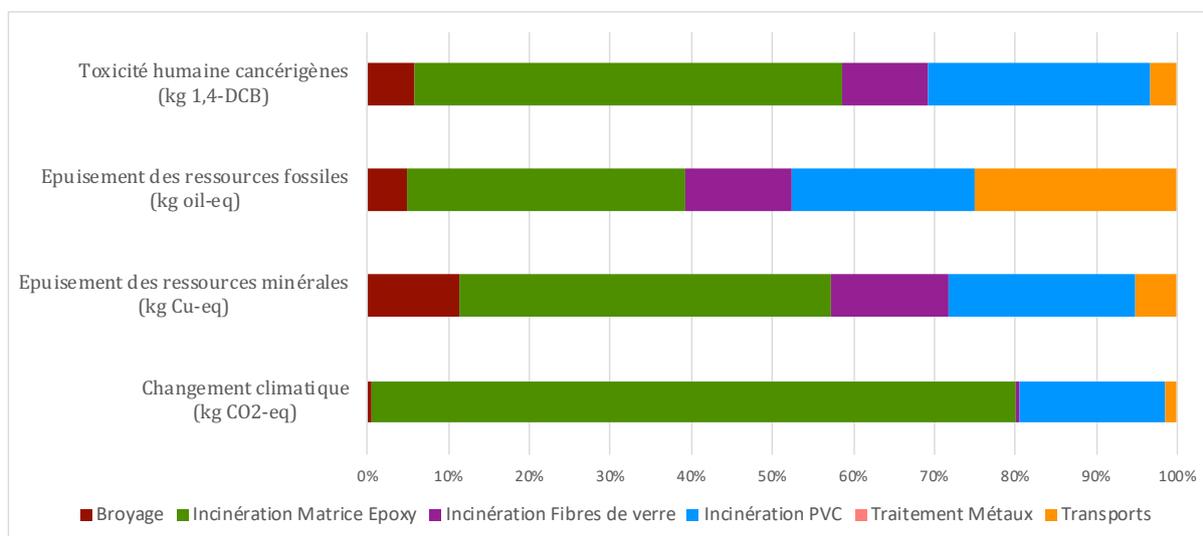


Figure 18: scénario 2 – incinération - détails des contributions aux quatre catégories d'impact

6.3.Scénario 3 : le co-traitement en four à ciment

Pour ce dernier scénario, les distances de transport entre le lieu de collecte et les différents sites de traitements sont plus élevées. Au total, les déchets ont parcouru 814 km. Cela a un effet non négligeable sur chacune des catégories d'impact, et notamment sur l'épuisement des ressources fossiles avec presque 60% des impacts. Les effets sur le changement climatique sont eux aussi fortement renforcés, avec des émissions de CO2 eq. qui ont plus que quadruplées entre les scénarios 2 et 3.

Table 6: scénario 3 – co-traitement en Allemagne - résultats de l'ACV pour les quatre catégories d'impact analysées.

Catégories d'impacts	Total	Broyage	Incinération Matrice Epoxy	Incinération Fibres de verre	Incinération PVC	Traitement Métaux	Transports
Changement climatique (kg CO2-eq)	13940,01	314,41	10354,42	27,69	2339,32	0,00	904,16
Epuisement des ressources minérales (kg Cu-eq)	6,75	0,58	2,62	0,67	1,31	0,00	1,57
Epuisement des ressources fossiles (kg oil-eq)	586,87	76,54	101,35	6,12	66,99	0,00	335,87
Toxicité humaine cancérigènes (kg 1,4-DCB)	51,65	3,77	23,99	3,47	12,50	0,00	7,92

Il est intéressant de remarquer que l'impact de l'incinération des matériaux plastiques reste similaire à ceux du scénario 2, ce qui est normal. Cependant, on observe une légère différence pour l'incinération des fibres de verre, notamment en ce qui concerne les impacts sur le changement climatique et l'épuisement des ressources fossiles (tableau 6). En effet, contrairement au scénario 2, les résidus après calcination des fibres de verre sont traités sur place et réintroduits dans le processus de fabrication du ciment, en remplacement à certains éléments chimiques.

L'étape de broyage dans le scénario 3 est bien plus impactante que dans le scénario 2, pour les catégories du changement climatique et de l'épuisement des ressources fossiles. Les émissions de gaz

à effet de serre ont augmenté de 53 à 314 kg CO₂ eq. De la même manière, la consommation de ressources fossiles est passée de 14 à 77 kg de pétrole eq. (figure 19). Ceci est principalement dû au mix énergétique du pays. La France utilise pour majorité de l'énergie décarbonnée, avec plus de 70% de nucléaire. L'Allemagne quant à elle produit plus de 40% de son énergie grâce à des centrales à combustibles fossiles (53).

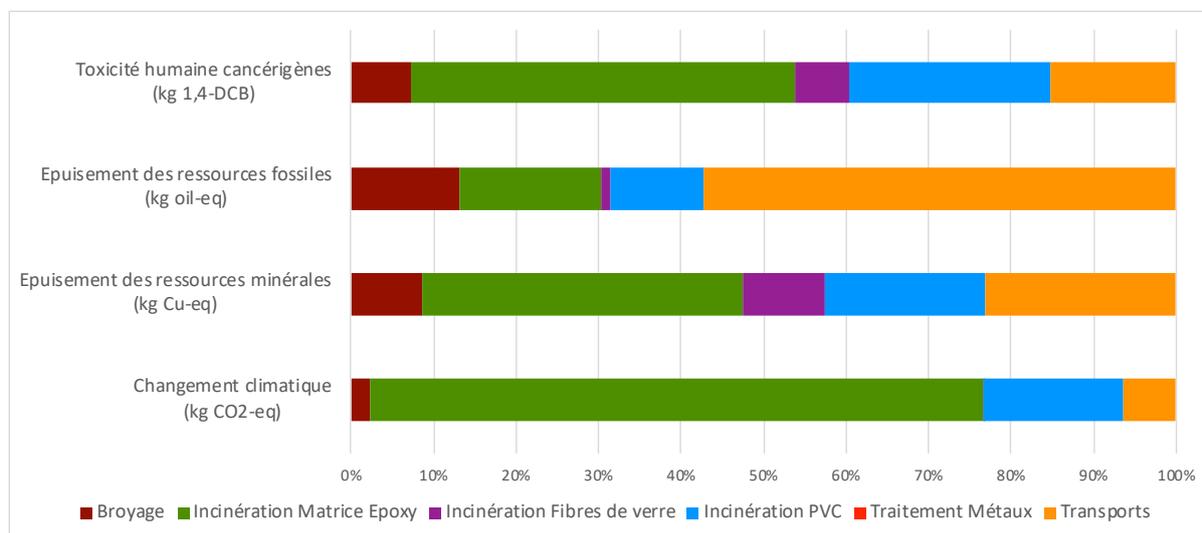


Figure 19: scénario 3 – co-traitement en Allemagne- détails des contributions aux quatre catégories d'impact

6.4. Influence des crédits d'impact sur les résultats

De la même manière que présenté précédemment, la figure 20 compare les trois scénarios pour chacune des catégories d'impact choisies. Cette fois, les crédits d'impact sont pris en compte. Pour l'enfouissement (scénario 1), aucun impact bénéfique n'est comptabilisé. Pour l'incinération avec récupération d'énergie (scénario 2), le recyclage du métal ainsi que la substitution de combustibles fossiles sont pris en compte comme impacts bénéfiques. Enfin, la gestion des déchets par co-traitement en four à ciment, permet d'obtenir des crédits d'impact pour le recyclage du métal, la substitution de combustibles fossiles mais également pour la substitution de matières premières dans la fabrication du ciment.

On parle de crédit d'impact environnemental pour le recyclage du métal car il évite la fabrication de métal vierge. La récupération de chaleur lors du traitement des déchets permet de remplacer et donc d'éviter la combustion de ressources fossiles. De la même manière, les résidus obtenus après calcination des fibres de verre sont utilisés dans la fabrication du ciment, ce qui évite de recourir aux matières premières vierges.

Pour rappel, les crédits d'impact sont exprimés en nombres négatifs. Au plus le scénario de gestion de fin de vie permet d'éviter des processus de production alternatifs, au plus le crédit d'impact sera élevé, et donc sa valeur absolue également.

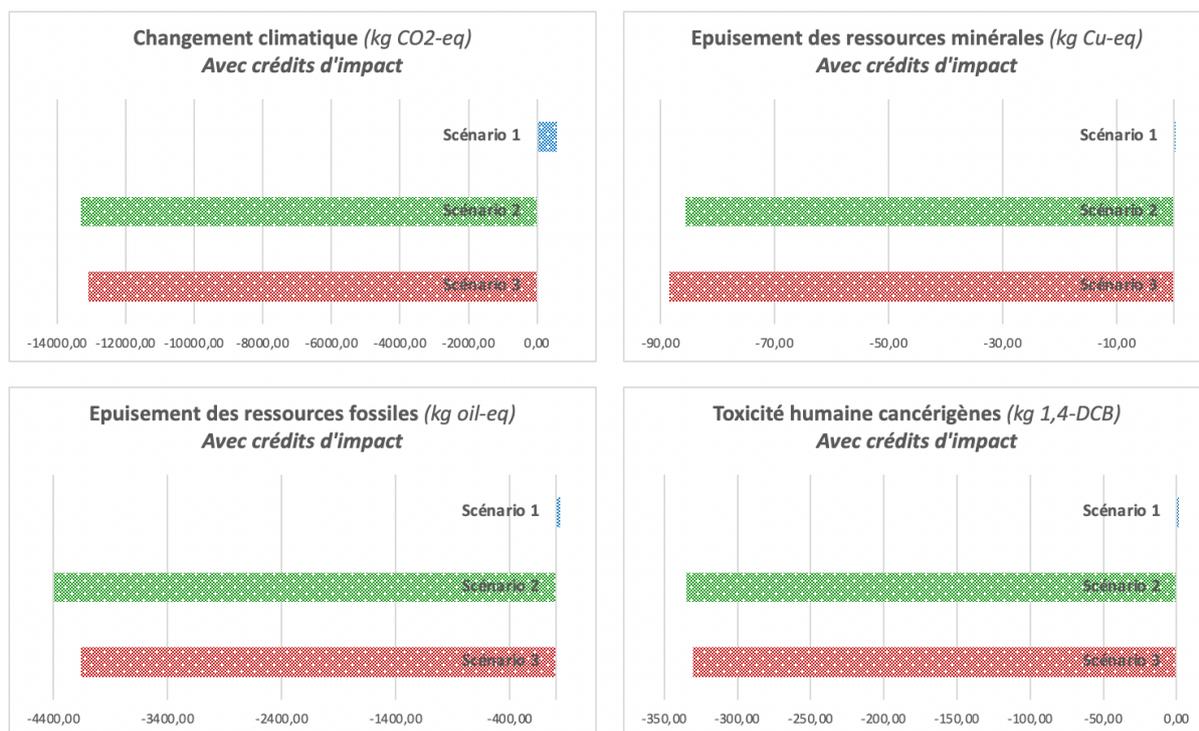


Figure 20: comparaison des impacts environnementaux des différents scénarios – avec crédits d'impact

Il est intéressant de souligner une fois encore l'importance de la méthode utilisée pour exprimer les résultats. En effet, la méthode cut-off nous a permis de mettre en évidence que l'enfouissement était le scénario le moins impactant pour les catégories choisies, alors qu'en prenant en compte les crédits d'impact, il se trouve finalement être le moins bénéfique pour l'environnement.

Les scénarios 2 et 3 semblent très proches pour chacune des catégories. Cela paraît cohérent, puisque les crédits d'impact pour le recyclage du métal et pour la substitution du charbon sont les mêmes. En effet, nous avons pris les données calculées pour l'Europe dans la base de données EcoInvent. A cela s'ajoute la substitution de matière première en cimenterie pour le scénario 3 et les différences de distances de transport. Le scénario 2 paraît être le plus bénéfique, puisque ses impacts sont les plus faibles pour toutes les catégories, sauf pour l'épuisement des ressources minérales.

7. Analyse de sensibilité

Dans cette partie, nous voulons évaluer la contribution des distances de transport sur la performance environnementale. Pour faire cette analyse de sensibilité, nous considérons la même gestion de fin de vie que le scénario 3, c'est-à-dire le co-traitement en four à ciment, cette fois ci localisé au cœur des Hauts-de-France. De plus, nous raisonnons de la même manière que pour les scénarios 1 et 2, c'est-à-dire en prenant les sites de traitement les plus proches. Pour ce scénario 4, que nous nommerons « co-traitement en four à ciment en France », les déchets de pales d'éoliennes sont d'abord transportés de Péronne jusqu'au centre de traitement en CSR de TVME à Evin Malmaison, puis jusqu'à la cimenterie de Lumbres Eqiom. Les distances de transport sont résumées dans le tableau 7.

Table 7: distances entre les sites de traitement pour les différents scénarios

Scénario	Point de départ	Point d'arrivée	Distance (km)
4	Péronne	TVME Evin Malmaison	68
4	TVME Evin Malmaison	Cimenterie Lumbres Eqiom	86

Au vu des résultats obtenus précédemment, nous décidons de comparer le nouveau scénario 4, aux scénarios 2 et 3 uniquement. L'influence des distances de transport pourra être étudiée en comparant les scénarios 3 et 4.

Les données présentées dans le tableau 8 ont été obtenues avec l'approche cut-off. Le tableau 8 présente les détails des résultats pour chacune des catégories d'impact. Sans surprise, les impacts liés aux transports sont divisés par cinq entre le scénario 3 (en Allemagne) et le scénario 4 (en France), les distances étant elles-mêmes divisées par cinq (814 km et 154 km respectivement). De plus, les transports du scénario 4 émettent moins de CO₂ eq. et sont responsables d'une plus petite quantité d'épuisement de ressources fossiles que dans le scénario 2, puisque les résidus des fibres de verre sont traités sur place en cimenterie.

Table 8: comparaison des impacts environnementaux des scénarios 2, 3 et 4 – approche cut-off

Catégorie d'impact	Scénario	Total	Pré-traitement	Traitement matériaux	Transports
Changement climatique (kg CO ₂ -eq)	Scénario 2	13016,05	52,65	12763,82	199,58
	Scénario 3	13940,01	314,41	12721,43	904,16
	Scénario 4	12945,14	52,65	12721,43	171,06
Epuisement des ressources minérales (kg Cu-eq)	Scénario 2	5,70	0,65	4,76	0,30
	Scénario 3	6,75	0,58	4,59	1,57
	Scénario 4	5,54	0,65	4,59	0,30
Epuisement des ressources fossiles (kg oil-eq)	Scénario 2	293,61	14,19	205,88	73,54
	Scénario 3	586,87	76,54	174,45	335,87
	Scénario 4	252,18	14,19	174,45	63,54
Toxicité humaine cancérogènes (kg 1,4-DCB)	Scénario 2	45,37	2,57	41,29	1,50
	Scénario 3	51,65	3,77	39,96	7,92
	Scénario 4	44,03	2,57	39,96	1,50

Les impacts liés à l'étape de prétraitement (broyage en CSR) sont les mêmes pour le scénario 2 et 4, puisqu'ils sont essentiellement liés au mix énergétique du pays. Pour rappel, le mix énergétique français est principalement basé sur une énergie décarbonnée, alors que l'Allemagne utilise encore beaucoup de combustibles fossiles (40% de son mix énergétique). De ce fait, les impacts sur le changement climatique et sur l'épuisement des ressources sont plus importants pour le scénario 3.

Le traitement des matériaux est le même pour les trois scénarios : les déchets sont incinérés en cimenterie. On observe une légère différence d'impact pour le scénario 2, puisque sont intégrés au traitement de la fibre de verre, les impacts liés à la construction du site d'enfouissement où sont traités

les résidus finaux. Dans le cadre de l'approche cut-off, le co-traitement en four à ciment en France (scénario 4) semble le moins impactant pour les quatre catégories d'impact.

De manière évidente, en intégrant les crédits d'impact qui restent inchangés, le scénario 4 a la meilleure performance environnementale comparé aux deux autres scénarios. Nous avons estimé que ce type de gestion de fin de vie permettait d'éviter l'émission d'environ 14 tonnes de CO₂ eq., l'épuisement de 90 kg de Cu eq. de ressources minérales et de 4,5 tonnes de pétrole eq. de ressources fossiles, et enfin d'éviter l'émission de 340 kg 1,4-DCB de substances toxiques pour la santé humaine (figure 21).

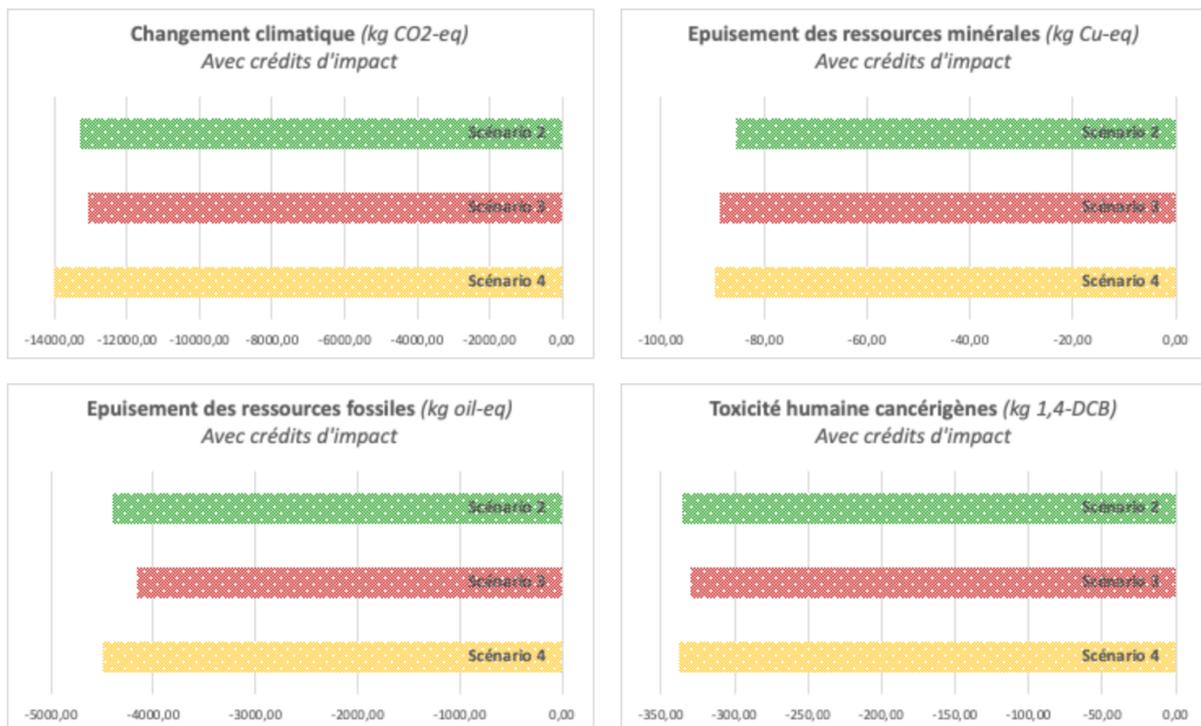


Figure 21: comparaison des impacts environnementaux des scénarios 2, 3 et 4 – avec crédits d'impact

Bien que le scénario 4 montre une meilleure performance environnementale, l'impact bénéfique lié à la réduction de la distance de transport reste marginal.

Nous avons également voulu évaluer l'influence d'une plus grande proportion de matière première substituée en cimenterie. Pour rappel, nous avons considéré un pourcentage de substitution de matières premières vierges en cimenterie de 10% dans les scénarios 3 et 4. Pour ce nouveau scénario, nous avons pris de manière arbitraire une substitution de 40%. La figure 22 présente les résultats pour une substitution de 40% dans le cadre du co-traitement en four à ciment réalisé en Allemagne (adaptation du scénario de base 3, afin d'observer l'influence d'un paramètre unique). L'augmentation du pourcentage de fibres de verre calcinées utilisé en remplacement aux matières premières du ciment a un effet bénéfique pour chacune des catégories d'impact, et plus particulièrement pour le changement climatique et l'épuisement des ressources minérales.

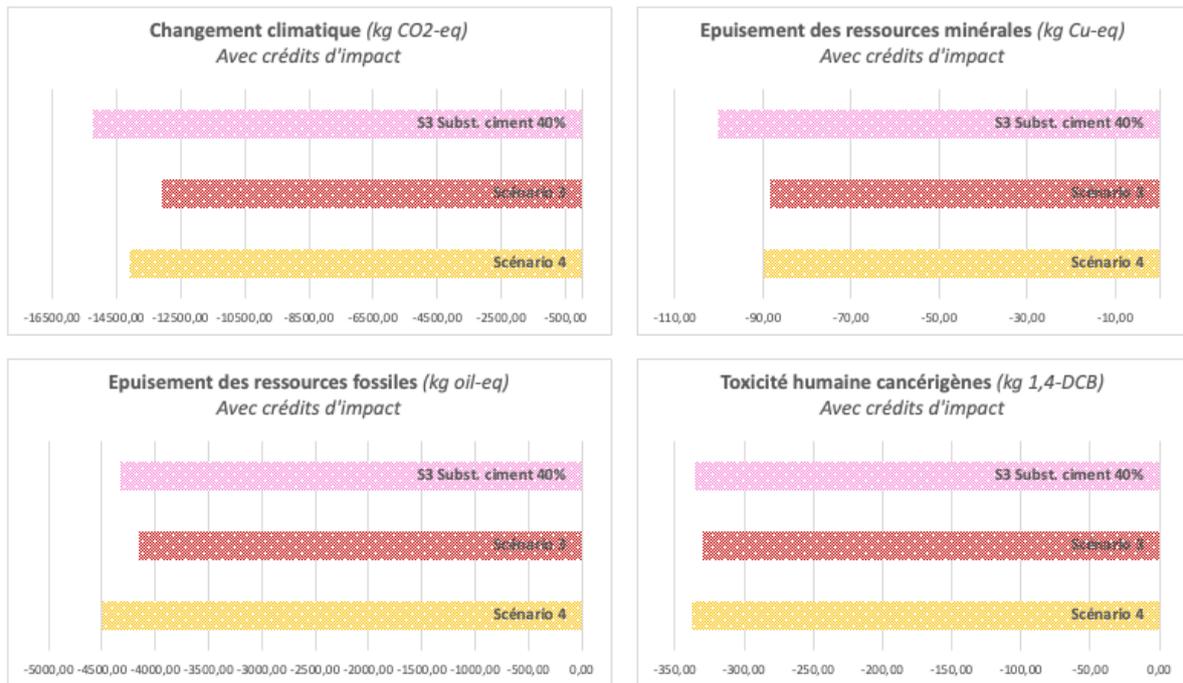


Figure 22: comparaison des impacts environnementaux pour les scénarios 3, scénario 3 avec 40% de substitution matière en cimenterie et scénario 4 – avec crédits d’impact

De plus, la figure 23 permet de comprendre la contribution au crédit d’impact total de la substitution de combustibles fossiles, la substitution du ciment et le recyclage du métal. La valorisation énergétique est le principal contributeur aux crédits d’impact des catégories du changement climatique et de l’épuisement des ressources fossiles, à hauteur d’environ 90%. L’avantage majeur de ces scénarios est la combustion du charbon évitée. Il est intéressant de remarquer le rôle central du recyclage du métal en ce qui concerne les bénéfices environnementaux des catégories d’impact suivantes : l’épuisement des ressources minérales (entre 80% et 90% selon la quantité de ciment substituée) et la toxicité humaine cancérigène (environ 65%).

L’augmentation du pourcentage de substitution de matières premières dans le ciment de 10% à 40% permet d’éviter l’émission d’un peu plus de deux tonnes de CO2 équivalent. La contribution du crédit d’impact de substitution passe de 3% à 10% pour la catégorie du changement climatique. De la même manière, les bénéfices concernant l’épuisement des ressources minérales permettent d’éviter 4 kg et 16 kg de Cu eq., pour une substitution de 10% et 40% respectivement. Enfin, bien que la contribution relative pour les deux autres catégories d’impact ne semble pas affectée par l’augmentation du taux de substitution, il est intéressant de noter l’évolution des valeurs absolue. Une substitution de 40% permet d’éviter la consommation de 160 kg de pétrole et l’émission de 4,7 kg 1,4-DCB de substances toxiques pour la santé humaine, par rapport à une substitution de 10%.

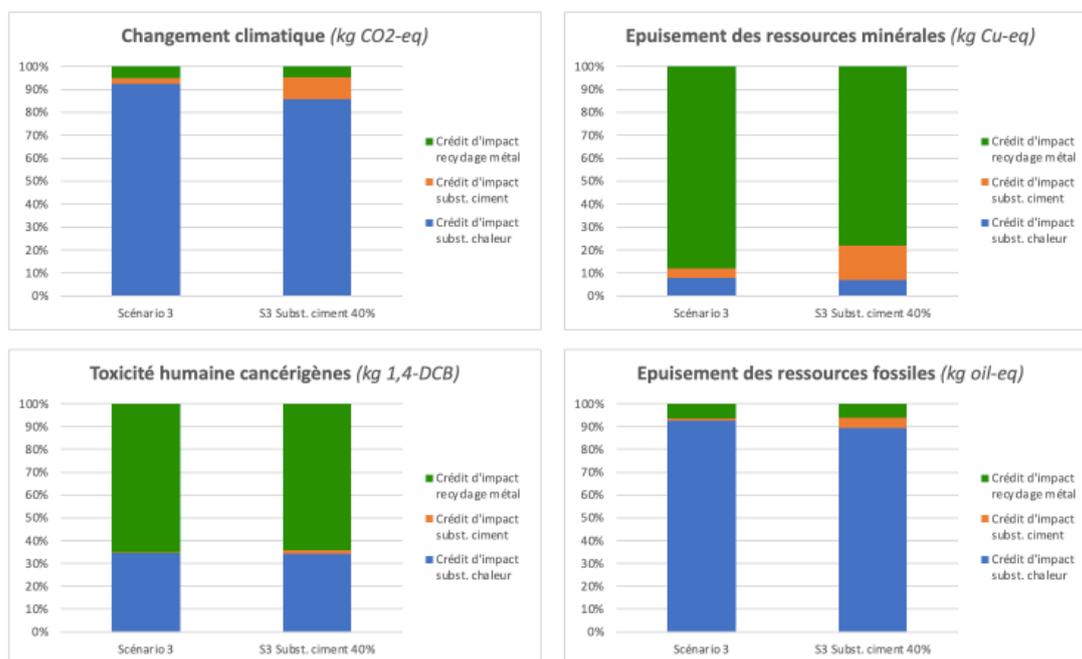


Figure 23: contribution des crédits d'impact de recyclage métal, de substitution ciment et de combustible fossiles, pour chacune des catégories d'impact, pour les scénarios 3 et scénario 3 avec 40% de substitution ciment.

8. Scénario à privilégier

Nous avons réalisé une ACV qui nous a permis de quantifier la performance environnementale de quatre scénarios : l'enfouissement, l'incinération avec valorisation énergétique, le co-traitement en four à ciment en Allemagne et le co-traitement en four à ciment en France. Le scénario établi dans la partie « analyse de sensibilité », avec un pourcentage de substitution de matières premières en cimenterie de 40% n'est pas repris ici. En effet, ce scénario hypothétique n'est pas validé du point de vue de la qualité du ciment final obtenu. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser ce scénario à l'heure actuelle, sans étude plus poussée sur l'influence du taux de substitution.

Le tableau 9 résume les résultats obtenus en classifiant pour chaque catégorie d'impact, les modes de traitement du plus favorable au moins favorable, en tenant compte des crédits d'impact. Les scénarios sont classés de 1 à 4, du plus au moins bénéfique pour l'environnement.

L'enfouissement est de loin le scénario le moins privilégié. Ce type de gestion de fin de vie est classé dernier pour chacune des catégories d'impact étudiées. L'incinération avec valorisation énergétique se classe deuxième pour toutes les catégories d'impact, sauf pour l'épuisement des ressources minérales pour lequel elle se classe en troisième position. Pour rappel, ce scénario a été utilisé pour 27% des pales démantelées en France jusqu'à aujourd'hui. Il est intéressant de noter la grande différence entre les méthodes de co-traitement en four à ciment en Allemagne et en France. Comme vu dans la partie précédente, les distances de transport jouent un grand rôle, notamment pour le changement climatique et l'épuisement des ressources fossiles. De ce fait, le traitement des pales en

co-traitement en four à ciment en France est la méthode avec la meilleure performance environnementale.

Table 9: classification pour chaque catégorie d'impact du mode de traitement du plus au moins favorable (échelle de 1 à 4), en prenant en compte les crédits d'impact

Catégorie d'impact	Scénarios			
	Enfouissement	Incinération avec valorisation énergétique	Co-traitement en four à ciment (Allemagne)	Co-traitement en four à ciment (France)
Changement climatique	4	2	3	1
Epuisement des ressources minérales	4	3	2	1
Epuisement des ressources fossiles	4	2	3	1
Toxicité humaine cancérigène	4	2	3	1

A notre connaissance ce mode de traitement n'a pas encore été utilisé en France. Nous avons voulu confirmer la viabilité de ce type de gestion à l'échelle nationale, en prenant en compte les traitements à une échelle le plus local possible afin de limiter les transports. Pour cela, la figure 24 montre d'une part le gisement annuel de déchets composites issus de la filière éolienne attendu en 2030, et la cartographie des sites de préparation de CSR et cimenteries d'autre part (24). La liste de ces sites de traitement est présentée en annexe. De manière général, la France semble posséder de nombreuses installations, assez bien réparties sur son territoire. Par comparaison des cartes ci-dessous, deux zones ont été identifiées comme potentiellement problématiques. En effet, les zones entourées en rouge posséderont beaucoup de déchets de pales d'éoliennes à l'horizon 2030, mais ce sont des régions qui ne possèdent pas ou peu de sites de traitement de CSR et de cimenteries. Des études complémentaires permettraient de réévaluer la méthode de traitement avec le moins d'impact environnemental, les distances de transport ayant une forte influence. Il semble que le contexte géographique du parc éolien à démanteler est un paramètre important à considérer dans le choix de la méthode de gestion des déchets de pales.

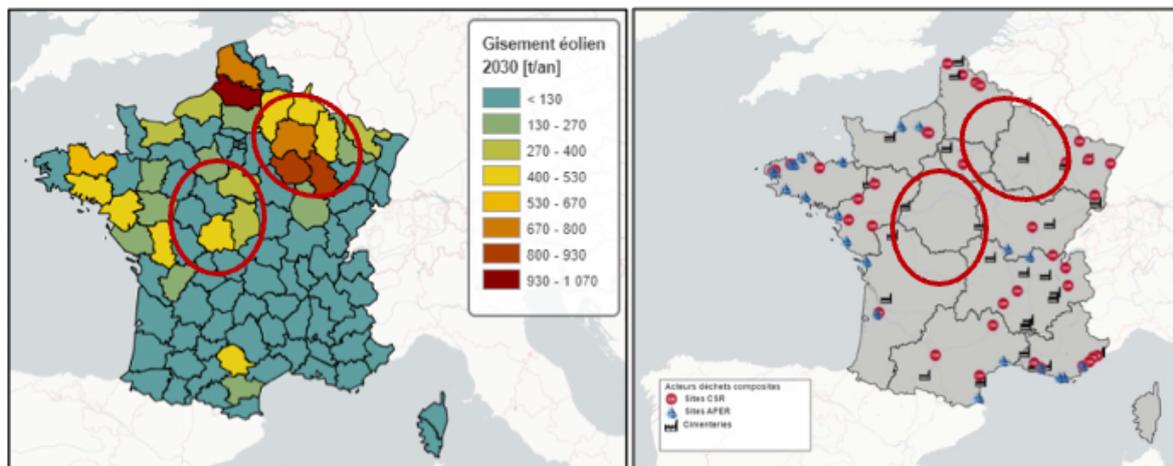


Figure 24: cartographie française représentant : à gauche : le gisement annuel de déchets composites issues de la filière éolienne attendu en 2030 ; à droite : les sites de préparation de CSR (en rouge) et les cimenteries (en noir) - ADEME

V. Conclusion et recommandations

Au 31 décembre 2021, la France comptabilise une puissance totale installée de 18,8 GW et le secteur de l'éolien représente un moteur socio-économique fort avec plus de 22600 emplois. L'énergie éolienne se développe sur le territoire français depuis le début des années 2000. Avec une durée de vie moyenne d'une vingtaine d'années, les premiers dispositifs arrivent aujourd'hui en fin de vie et doivent être démantelés. Bien que plus de 90% en masse d'une éolienne puisse être valorisé par des filières de recyclage existantes, les pales, principalement constituées de matériaux composites à base de fibres de verre et d'une matrice thermodurcissable, sont difficilement recyclables. En considérant une masse moyenne de 11 tonnes/ MW, le flux de matériaux composites provenant des déchets de pales peut ainsi être calculé. En 2030, le flux annuel à traiter sera de 17 000 tonnes. L'accumulation de ces déchets dans les années à venir, met en évidence l'urgence de leur gestion efficace et globale.

Après un bref rappel sur le fonctionnement de l'énergie éolienne et sur sa composition, nous nous sommes intéressés à la législation encadrant le démantèlement des pales d'éoliennes. Le Code de l'environnement détaille les opérations de démantèlement obligatoires et prévoit la constitution de garanties financières par l'exploitant à hauteur de 50000 euros par éolienne de puissance de 2MW afin d'en couvrir les frais. Cependant, ce montant est questionnable quant à sa capacité à couvrir les coûts réels de déconstruction, la prise en charge des différents matériaux et la remise en l'état du site d'exploitation. De plus, le Code de l'environnement établit une hiérarchisation des modes de traitement des déchets dans le cadre de la transition vers une économie circulaire. Il prévoit d'abord la prévention par l'allongement de la durée de vie et optimisation des matériaux utilisés, puis le réemploi en donnant une « seconde vie » aux pales, le recyclage des matériaux, la valorisation énergétique, puis en dernier recours l'élimination par mise en décharge. Nous avons revu chacune de ces méthodes en détail, et en ce qui concerne le recyclage, seulement celles avec un niveau de maturité de TRL 9 minimum. Pour rappel, celles-ci correspondent à des méthodes déjà opérationnelles : le recyclage mécanique, la pyrolyse et le co-traitement en four à ciment. Ce choix a été fait afin d'envisager des actions pouvant être mises en place rapidement.

Nous avons ensuite réalisé une ACV avec pour objectif de dresser le bilan environnemental de trois scénarios de gestion des pales d'éoliennes en fin de vie : l'enfouissement, l'incinération avec valorisation énergétique et le co-traitement en four à ciment en Allemagne. Pour chacun de ces scénarios, quatre catégories d'impact ont été évaluées : le changement climatique, l'épuisement des ressources minérales et fossiles, ainsi que la toxicité humaine cancérigène.

En considérant l'approche cut-off, c'est-à-dire sans prendre en compte les crédits d'impact provenant des substitutions et du recyclage, l'enfouissement semble la méthode avec le plus faible impact sur l'environnement. Cependant, dès lors où ces derniers sont comptabilisés, l'incinération avec

valorisation énergétique semble à privilégier. En effet, ce scénario évite la consommation de combustibles fossiles et l'extraction de métal vierge.

Pour le scénario de co-incinération en Allemagne, les impacts liés aux transports sont considérables. Ceci nous a questionné sur l'influence des distances de transport sur la performance environnementale. C'est pourquoi nous avons réalisé une analyse de sensibilité, dans laquelle nous avons évalué le même type de traitement à une échelle locale en France. La combinaison du mix énergétique décarbonné français par rapport à celui de l'Allemagne, ainsi que les distances à parcourir entre les différents sites de traitement cinq fois inférieures, a permis de montrer que le co-traitement en four à ciment en France à une meilleure performance environnementale, et également par rapport à l'incinération avec valorisation énergétique. Le taux de substitution de matière première en cimenterie est également un paramètre important, puisqu'une substitution de 40% permet d'éviter l'émission de deux tonnes de CO₂ eq. et 12 kg de Cu eq. de ressources minérales, par rapport à un taux de remplacement de 10%.

La cartographie française des sites de préparation de CSR et des cimenteries montrent leur présence sur la majorité du territoire. Cependant, deux régions amenées à avoir un taux de gisement de déchets de pales d'éoliennes important à l'horizon 2030, présentent peu d'infrastructures de traitement à l'échelle locale. Comme l'impact des distances de transport est non négligeable, il serait intéressant de réaliser des études complémentaires spécifiques à ces contextes géographiques afin de confirmer la meilleure méthode de gestion des déchets de pales dans ces cas-là.

Pour conclure, quatre recommandations pour améliorer la performance environnementale du traitement des pales d'éoliennes en fin de vie peuvent être faites. Elles résultent principalement de notre recherche documentaire ainsi que de l'ACV réalisée. Pour rappel, dans le cadre de cette recherche, uniquement les pales d'éoliennes composées de fibres de verre ont été étudiées. Une étude complémentaire pour évaluer la performance environnementale de la valorisation des pales composées de fibres de carbone permettrait une visualisation complète.

Recommandation 1 : améliorer l'accessibilité des données.

Au fil de notre étude, nous avons pu constater la difficulté à rassembler des données fiables sur l'état actuel des parcs éoliens ayant atteint leur fin de vie. Par exemple, les informations concernant le devenir des pales ayant été démantelées ainsi que les méthodes de gestions majoritairement utilisées sont difficilement accessibles, aussi bien dans la littérature grise (i.e. documents d'administrations, synthèses de recherches, sites internet...) que par contact direct avec les acteurs du secteur. Nous pensons qu'il est important de mettre en place un outil de visualisation permettant de répertorier de manière transparente l'état actuel ainsi que le devenir des parcs éoliens après démantèlement. En plus d'être intéressant de rendre ces informations accessibles au plus grand nombre, du citoyen lambda aux pouvoirs publics, ces données sont cruciales afin de prévoir et anticiper la gestion des flux futurs de matériaux composites issus du démantèlement.

Recommandation 2 : renforcer la législation pour la gestion des déchets et les nouvelles productions.

La législation est un moteur, voir un accélérateur, afin de faire évoluer les normes. En Allemagne par exemple, l'évolution de la loi interdisant l'enfouissement de déchets contenant plus de 5% de plastique a permis à d'autres alternatives de se développer rapidement. Le co-traitement en four à ciment fait partie de ces nouvelles solutions apparues il y a quelques années, en 2015. Des engagements forts de la part des pouvoirs politiques permettraient d'orienter aussi bien les choix de filières de gestion de déchets que les objectifs des constructeurs. Pour rappel, le Code de l'environnement prévoit qu'un minimum de 35% en masse des rotors devra être réutilisé ou recyclé après le 1^{er} janvier 2025. Les pales ne semblent pas concernées par cette obligation, puisqu'elles constituent environ 55% en masse du rotor. De plus, le Code de l'environnement met en avant la nécessité de considérer la gestion de fin de vie dès la phase de développement du produit. Il met ainsi l'accent sur l'écoconception en obligeant les constructeurs à viser un minimum de 55% en masse des rotors à être réutilisables ou recyclables. Le renforcement de la législation concernant le démantèlement et la production des pales futures (favoriser la recyclabilité par un cahier des charges stricte) nous semble nécessaire.

Recommandation 3 : favoriser la valorisation des déchets par la méthode de co-traitement en four à ciment, en minimisant les distances de transport entre les sites de traitement.

L'ACV réalisée dans le cadre de ce mémoire a permis de montrer que la méthode de gestion des déchets de pale d'éolienne qui présente les meilleures performances environnementales pour les catégories d'impact du changement climatique, de l'épuisement des ressources minérales et fossiles et de la toxicité humaine cancérigène, est la méthode de co-traitement en four à ciment. L'analyse de sensibilité a soulevé la forte influence des distances de transport entre les différents sites de traitement. Dans le cadre de notre hypothèse de démantèlement d'un parc situé à Péronne, cette méthode de traitement à proximité en France permet une diminution des impacts comparé au même type de gestion en Allemagne. Les impacts liés au transport sont bien entendu proportionnels à la distance parcourue. La couverture globale du territoire français par des installations de préparation de CSR et de cimenterie laisse penser que cette stratégie peut être utilisée à l'échelle nationale. Une étude complémentaire permettra de confirmer la meilleure méthode de gestion dans certains cas où le contexte géographique implique de grandes distances de transport.

Recommandation 4 : maximiser les substitutions de matières premières et le recyclage.

L'analyse détaillée des crédits d'impact nous a permis de mettre en évidence les contributions bénéfiques des deux types de substitutions et du recyclage. La valorisation énergétique permet d'éviter l'utilisation de combustibles fossiles et influence principalement les impacts sur le changement climatique et l'épuisement des ressources fossiles. Nous avons calculé qu'environ 90% du crédit d'impact provenait de la substitution de combustibles fossiles pour ces deux catégories. Le recyclage

du métal joue un rôle prépondérant pour l'amélioration de la performance environnementale des deux catégories suivantes : l'épuisement des ressources minérales et la toxicité humaine cancérigène. Enfin, la substitution de matière première en cimenterie permet notamment une diminution des effets néfastes sur le changement climatique et l'épuisement des ressources minérales. L'augmentation du taux de substitution, implique un crédit d'impact plus élevé. Il faudra cependant faire attention à conduire une étude complémentaire afin de déterminer le pourcentage maximum autorisé afin de ne pas impacter les propriétés et la qualité du ciment.

Limites de l'étude :

La limite principale de cette étude se trouve au niveau de l'inventaire. Cet aspect est en lien avec la recommandation 1, dans laquelle un manque de visibilité et de transparence a pu être observé quant au devenir des pales d'éoliennes en fin de vie sur le territoire français. De plus, il nous a été difficile d'obtenir des données auprès des acteurs principaux du secteur de l'éolien (constructeurs, associations, établissement public comme l'ADEME etc). Une série d'hypothèses a donc été émise afin d'établir le cadre de notre ACV, comme la définition de la frontière géographique de notre système.

De plus, bien que l'approche multicritère de l'ACV constitue un réel atout, nous soulignons l'importance de la réalisation d'un travail complémentaire englobant à la fois les caractéristiques environnementales, sociétales et économiques.

Perspectives :

Des avancées technologiques dans le domaine du recyclage des matériaux composites pourraient voir le jour dans les années à venir. Il serait alors intéressant d'en évaluer les performances environnementales et de les comparer à nos résultats.

Bien que cette étude porte sur la définition de la méthode de traitement de déchets de pales d'éoliennes avec la meilleure performance environnementale, il est important de mettre en avant l'importance de la recherche et développement pour la construction des nouvelles pales. L'écoconception des pales du futur semble au cœur des discussions actuelles, avec de nombreux projets prometteurs, qui permettraient un démantèlement plus simple et une valorisation des déchets systématique, limitant les impacts environnementaux.

Ce mémoire nous a permis de mettre en évidence l'enjeu du recyclage des pales d'éoliennes, mais il est important de noter que cette problématique va au-delà du scope de l'éolien. En effet, un grand nombre d'industries utilisent les matériaux composites (naval, aviation, équipements sportifs), ce qui met en évidence l'enjeu environnemental crucial du recyclage des matériaux composites de manière plus globale.

Bibliographie

1. *A European Green Deal*. [En ligne] 2020. [Citation : 2 Juillet 2022.] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
2. WindEurope. *Wind energy today*. [En ligne] 2022. [Citation : 2022 April 30.] <https://windeurope.org>.
3. ADEME. *Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France*. 2019.
4. Liu, P. et Barlow, C.Y. *Wind turbine blade waste in 2050*. *Waste management*, Elsevier. 2017, pp. 229-240.
5. Mishnaevsky, L. *Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Iverview of Current and Coming Solutions*. *materials*. 2021, p. 1124.
6. Mello, Gisela, Ferreira, Marta et Robaina, Dias Margarita. *Evaluation of the environmental impacts related to the wind farms end-of-life*. *ELSEVIER*. June 2022, pp. 35-40.
7. RTE. *Bilan Electrique 2021*,. s.l. : Réseau de Transport Electrique,, 2022.
8. FFE, *Observatoire de l'éolien 2021*,. *Analyse du marché, des emplois et des enjeux de l'éolien en France*. s.l. : FFE, 2021.
9. Légifrance. [En ligne] 2015. [Citation : 30 April 2022.] *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte*, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031044385>.
10. PPE. *Stratégie française pour l'énergie et le climat*. s.l. : *Programmation Pluriannuelle de l'énergie*, 2021. Synthèse.
11. WindEurope. *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. s.l. : WindEurope, 2020.
12. —. *Wind Energy Basics*. [En ligne] 2022. [Citation : 20 April 2022.] <https://windeurope.org/about-wind/wind-basics/>.
13. *énergétique, Ministère de la Transition*. *Éolien terrestre*. [En ligne] 21 Avril 2022. [Citation : 3 Juillet 2022.] <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-terrestre>.
14. Enercoop, *Energie Partagée et Terre de liens*. *Bétonisation et artificialisation des terres : quelle contribution de l'éolien ?* [En ligne] Janvier 2020. [Citation : 22 May 2022.] <https://decrypterlenergie.org/betonisation-et-artificialisation-des-terres-quelle-contribution-de-leolien>.

15. ISO. ISO 472:2013 Plastiques — Vocabulaire. [En ligne] [Citation : 6 July 2022.] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:472:ed-4:v1:fr>.
16. Enevoldsen, E. Bagge Paulsen and Peter. *Energies. A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades*. 2021.
17. Angela J. Nagle, Emma L Delaney, Lawrence C. Bank, Paul G. Leahy. *A comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades*. Elsevier. 14 July 2020.
18. Beauson, Justine et Brondsted, Povl. *Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective*. MARE-WINT. 2016.
19. Légifrance. *Code de l'environnement*. [En ligne] 2021. [Citation : 2022 04 1.] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043974936/.
20. Ricour, Jacques. *Évaluation du coût de déconstruction sélective d'une éolienne de 2 MW*. Lille : s.n., 2019.
21. Légifrance. *Décret n° 2021-1199 du 16 septembre 2021 relatif aux conditions d'élimination des déchets non dangereux*. [En ligne] 18 Septembre 2021. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044060460>.
22. Kadri, F. *AFP Factuel*,. [En ligne] 2021. [Citation : 2022 05 2.] *Impossible d'enterrer des pales d'éoliennes en France, mais leur recyclage pose problème*, <https://factuel.afp.com/impossible-denterrer-des-pales-deoliennes-en-france-mais-leur-recyclage-pose-probleme>.
23. Beauson, J., et al. *The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context*. ELSEVIER. Mars 2022.
24. ADEME. *GUIDE DU RECYCLAGE ET DE L'ECOCONCEPTION DES COMPOSITES*. s.l. : ADEME, 2022. *Rapport technique*.
25. Luttrupp, Conrad. *10 Golden Rules in EcoDesign*. Stockholm : KTH Machine Design, 2016.
26. IRT Jules Verne, Nantes Université. *ZEBRA project*. [En ligne] [Citation : 30 May 2022.] <https://www.irt-jules-verne.fr/en/follow-our-news/irt-jules-verne-launches-zebra-project-to-develop-100-recyclable-composite-wind-turbine-blades-with-industrial-partners/>.

27. Nippert, Aline. *Projet Zebra : la première pale d'éolienne en résine thermoplastique entièrement recyclable sort d'usine.* [En ligne] 28 Mars 2022. [Citation : 23 June 2022.] <https://www.usinenouvelle.com/article/projet-zebra-la-premiere-pale-d-eolienne-en-resine-thermoplastique-entierement-recyclable-sort-d-usine.N1804677>.
28. *Influence of loads and environmental conditions on material properties over the service life of rotor blades.* Sayer, F, et al. 2012, *Wind Energy - Wiley Online Library*, pp. 163-174.
29. Bennet, Lorna. *SUSTAINABLE DECOMMISSIONING: WIND TURBINE BLADE RECYCLING REPORT.* s.l. : *Offshore Renewable Energy Catapult*, 2021.
30. Wikipédia. *Technology readiness level.* [En ligne] [Citation : 3 Juillet 2022.] https://fr.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level.
31. *Global Fiberglass Solutions.* [En ligne] <https://www.globalfiberglassinc.com>.
32. *Reprocover.* [En ligne] <https://reprocover.eu/project/cendrier-poubelle/>.
33. Meyer, L.O., Schulte, K. et Grove-Nielsen, E. *CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials.* *Journal of Composite Materials.* 29 January 2009.
34. Cunliffe, A. M., Jones, N. et Williams, P. T. *Pyrolysis of composite plastic waste.* *Environmental Technology.* 3 December 2002, pp. 653-663.
35. Wikipedia. *Combustible solide de récupération.* [En ligne] [Citation : 23 June 2022.] https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustible_solide_de_r%C3%A9cup%C3%A9ration.
36. Neowa. *Innovationen zum Schutz der Umwelt.* [En ligne] [Citation : 5 Juillet 2022.] <https://www.neowa.de/ueber-neowa>.
37. *Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: a case study regarding GFRP pultrusion wastes.* Ribeiro et al. s.l. : Elsevier, 2015, Elsevier, pp. 417-426.
38. Martin, Chris. *Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills.* *Bloomberg GreenEnergy & Science.* [En ligne] 5 Février 2020. [Citation : 24 Juin 2022.] <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>.
39. *ISO 14040:2006(fr) Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre.* [En ligne] 2006. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr>.

40. ADEME. *ÉCONOMIE CIRCULAIRE L'analyse du cycle de vie*. [En ligne] 2018. [Citation : 26 June 2022.] <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.
41. HAOUES, Nizar. *Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle*. s.l. : Pôle Eco-conception et Management du Cycle de Vie.
42. Saad, Rosie, Chayer, Julie-Anne et Clément, Edouard. *Lignes directrices pour la réalisation d'analyses du cycle de vie environnementales*. Montréal : Quantis, 2011.
43. SimaPro. *LCA software for informed change-makers*. [En ligne] [Citation : 2 Juin 2022.] <https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>.
44. *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology*. WERNET, Gregor, BAUER, Christian, STEUBING, Bernhard, REINHARD, Jürgen, MORENO-RUIZ, Emilia et WEIDEMA, Bo. s.l. : *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, Vol. 21, pp. 1218–1230.
45. MAJ, Huijbregts, ZJN, Steinmann, PMF, Elshout, G, Stam, F, Verones, MDM, Vieira, A, Hollander, M, Zijp et R, van Zelm. *ReCiPe 2016 : A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. Netherlands : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, 2016.
46. VÉDRINE, Louis et JOURDAIN, Xavier. *Cycle de vie des éoliennes : tout sauf du vent*. Paris : Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, 2020.
47. Zero Waste France. [En ligne] 2019. [Citation : 2022 04 1.] <https://www.zerowastefrance.org/hierarchie-modes-traitement-dechets-juridictions-jurisprudence-application/>.
48. ADEME. *SINOE ® - Annuaire 2016 des installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND)*. [En ligne] [Citation : 2 July 2022.] <https://data.ademe.fr/datasets/sinoe-annuaire-isdnd-2016-ok>.
49. AISBL, EuRIC. *Metal Recycling Factsheet*. Brussel : EuRIC AISBL, 2020.
50. SYMEVAD. *Unité de Tri Valorisation Matière et Énergie (TVME)*. [En ligne] [Citation : 28 June 2022.] <https://www.symevad.org/valoriser-mes-dechets/unite-de-tri-valorisation-matiere-et-energie-tvme>.

51. Somers, Julian. *Décarbonisation profonde de l'industrie : Le secteur du ciment*. [En ligne] 6 Mai 2020. [Citation : 5 Juillet 2022.] <https://ee-ip.org/fr/article/decarbonisation-profonde-de-lindustrie-le-secteur-du-ciment-1773>.
52. *énergie*, Ministère de la Transition. *Normes euros d'émissions de polluants pour les véhicules lourds - Véhicules propre*. [En ligne] 27 Mars 2017. [Citation : 8 Juillet 2022.] <https://www.ecologie.gouv.fr/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres>.
53. *Électricité en Allemagne*. [En ligne] 2021. [Citation : 12 Juillet 2022.] https://fr.wikipedia.org/wiki/Électricité_en_Alemagne.
54. Silva and Raadal, Mafalda Silva and Hanne Lerche Raadal. *Life cycle GHG emissions of renewable and non-renewable electricity generation technologies*. 2019.
55. RTE. *Panorama de l'électricité renouvelable. s.l. : Le réseau de transport d'électricité (RTE), 2021*.
56. Eurostat. *Energy balance*. Eurostat. [En ligne] 2022. [Citation : 26 04 2022.] https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=FR&year=2020&unit=GJ&fuels=RA000&highlight=_&nodeDisagg=0101000000000&flowDisagg=true&translateX=0&translateY=0&scale=1&language=EN.
57. ECRT. *ECRT*. [En ligne] 2022. [Citation : 30 April 2022.] <https://ecrtechnology.com>.
58. Wikipedia. *Énergie éolienne en France*. [En ligne] 2022. [Citation : 2022 April 12.] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne_en_France#Histoire.
59. RTE. *Bilan Electrique 2021. s.l. : Réseau de Transport Electrique, 2022*.
60. ReFiber. [En ligne] <https://www.refiber.com/technology.html>.
61. *Arrêté du 22 juin 2020 du Code de l'environnement. Légifrance. 2022*.

Annexes

Société/Exploitant	Nom du site	Commune (Département)
SERRAND	Site de Serrand	Dortan (01)
VEOLIA	CTHP Valazur	Nice (06)
VEOLIA	Centre de tri de villeneuve - Loubet	Villeeneuve-Loubet (06)
SMED06	Centre de valorisation organique	Cannes la bocca (06)
GRAND NARBONNE	Ecopole Narbonne	Narbonne(11)
SUEZ PROVENCE VALORISATION	Provence Valorisation	Istres (13)
EPUR	Usine de Gignac-La-Nerthe	Gignac-La-Nerthe (13)
BOURGOGNE RECYCLAGE	Site de Beaune	Ruffey les Beaume (21)
KERVAL	UTVME=Unité de Tri-Valorisation matière Energie	Ploufragan (22)
NPC	Unité d'Alizay	Alizay (27)
RECYCLEURS BRETONS	CTHP St Thudon	Guipavas (29)
GUYOT ENVIRONNEMENT	Site de St Martin	Saint-Martin des-Champs (29)
GUYOT ENVIRONNEMENT	Site de Brest	Brest (29)
PAPREC	Site de Bruières PAPREC	Bruguères (31)
GROUPE PENA	CORIS	Mérignac (33)
SERMACO	Plateforme d'activités de SERMACO	Ricamarie (42)
3WAYSTE	Ecopôle ALTRIOM	Polignac (43)
NANTES METROPOLE	CTHP du site Arc en Ciel	Coueron (44)
BARBAZANGES TRI OUEST	Site Tri OUEST	Chateaubriant (44)
ENVIRONNEMENT MASSIF CENTRAL	Site d'Environnement Massif Central	Mende (48)
BRANGEON RECYCLAGE	CDT de Cholet	Cholet (49)
SECHE	Pole multi-filière de Changé	Changé (53)
VEOLIA	CTHP de Ludres	Ludres (54)
EQIOM	Plateforme intégrée sur la cimenterie de Heming	Heming (54)
VTB	Site de Longeville	Longeville-lès-Saint-Avoid (57)
BAUDELET	Centre de Préparation Matières (CPM) et fabrication de CSR	Blaringhem (59)
SYMEVAD	TVME	Evin Malmaison (62)
OPALE ENVIRONNEMENT (Séché)	Centre de tri de Calais	Calais (62)
VANHEEDE ENVIRONNEMENT SAS	Site VANHEEDE	Billy Berclau (62)
Bluepaper	Bluepaper	Strasbourg (67)
Cernay Environnement	Cernay Environnement	Cernay (68)
BIOVAL	BIOVAL (anciennement site de SIBUET)	Chamoux sur Gelon (73)
EXCOFFIER	Centre de tri haute performance d'Excoffier	Villy-le-Pelloux (74)
VEOLIA	Propreté Nord Normandie (VEOLIA)	Oissel (76)
SCLAVO ENVIRONNEMENT	Ecopôle SOFOVAR DND	Fréjus (83)
SEMARDEL	SEMAVAL	Echarcon (91)

Figure 25: Les 36 sites de préparation du CSR identifiés sur le territoire français (24)

Société/Exploitant	Nom du site	Commune (Département)
EQIOM	Cimenterie de Rochefort-sur-Nenon Eqiom	Rochefort-sur-Nenon (39)
EQIOM	Cimenterie de Lumbres Eqiom	Lumbres (62)
EQIOM	Cimenterie de Héming Eqiom	Héming (57)
Calcia	Cimenterie d'Airvault Ciments Calcia	Airvault (79)
Calcia	Cimenterie de Beaucaire Ciments Calcia	Beaucaire (30)
Calcia	Cimenterie de Beffes Ciments Calcia	Beffes (18)
Calcia	Cimenterie de Bussac Ciments Calcia	Bussac-Forêt (17)
Calcia	Cimenterie de Couvrot Ciments Calcia	Vitry-le-François (51)
Calcia	Cimenterie de Cruas Ciments Calcia	Cruas (07)
Calcia	Cimenterie de Gargenville Ciments Calcia	Gargenville (78)
Calcia	Cimenterie de Ranville Ciments Calcia	Ranville (14)
Calcia	Cimenterie de Villiers-au-Bouin Ciments Calcia	Villiers-au-Bouin (37)
VICAT	Cimenterie de Montalieu - Usine Vicat	Montalieu-Vercieu (38)
VICAT	Cimenterie de Créchy - Usine Vicat	Créchy (03)
VICAT	Cimenterie de Peille - Usine Vicat	Blausasc (06)
VICAT	Cimenterie de Xeuilley - Usine Vicat	Xeuilley (54)
VICAT	Cimenterie de Saint-Égrève - Usine Vicat	Saint-Egrève (38)
VICAT	Cimenterie de Perelle - Usine VICAT	Saint-Laurent-du-Pont (38)
Lafarge	Lafarge Usine de la malle, Lafarge ciments	Bouc-bel-air (13)
Lafarge	Lafarge Usine de Val d'Azergues	Chatillon (69)
Lafarge	Lafarge Ciments, Route de Bréal	Saint-Pierre-la-Cour (53)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Port-la-Nouvelle	Port-la-Nouvelle (11)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Martres-Tolosane	Martres-Tolosane (31)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Altkirch	Altkirch (68)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Contes	Contes (06)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine du Teil	Le Teil (07)
Imerys aluminates	Imerys aluminates, usine de Mardyck	Dunkerque (59)
Imerys aluminates	Imerys aluminates, usine de Fos-sur-Mer	Fos-sur-Mer (13)
Imerys aluminates	Imerys aluminates, usine du Teil	Le Teil (07)

Figure 26: Les 29 cimenteries identifiées sur le territoire français (24)