



# Impacts environnementaux de l'éolien français

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

# ➔ Cadre

## Contexte du projet

Les objectifs du mix électrique français, retenus dans le Grenelle de l'Environnement et dans la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte, comprennent une part d'électricité d'origine renouvelable de 27 % de la consommation d'énergie finale d'ici à 2020, et de 40 % en 2030. Dans cette optique, l'énergie éolienne fournira une contribution importante à cette évolution du mix électrique. Il est donc nécessaire de consolider et quantifier spécifiquement les impacts environnementaux de la filière éolienne française.

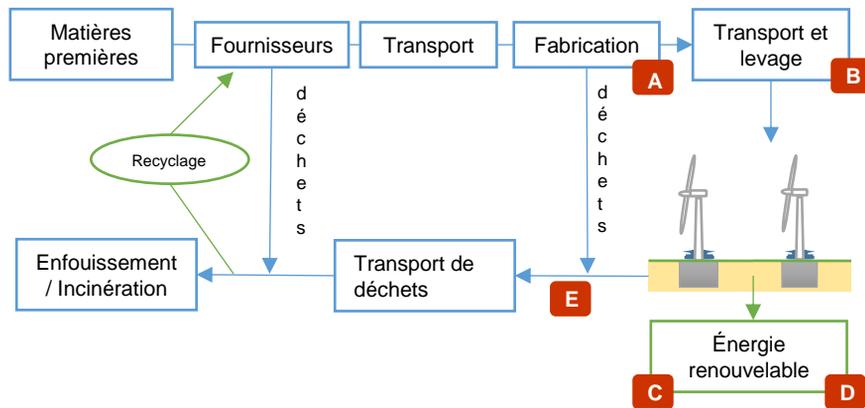
## Objectifs du projet

Cette étude a pour but de fournir des données précises sur les impacts environnementaux de la production éolienne avec les spécificités du parc français installé sur terre et prévu en mer. L'étude a également pour objectif de quantifier et de qualifier sur des indicateurs l'état de ressources primaires utilisées pour la production d'électricité d'origine éolienne et la pression exercée sur ces ressources.

## Champ de l'étude

Les différentes étapes du cycle de vie d'une installation éolienne sont incluses dans les frontières du système :

- A** Fabrication des composants du système
- B** Installation du système éolien
- C** Utilisation
- D** Maintenance
- E** Désinstallation, traitement en fin de vie



## L'Analyse de Cycle de Vie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil fréquemment utilisé pour le calcul des impacts environnementaux du secteur de l'énergie. L'ACV permet d'évaluer l'impact environnemental d'un produit en tenant compte de l'extraction et du traitement des matières premières, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation et de la réutilisation du produit fini, et finalement, du recyclage et de la gestion des déchets en fin de vie.

### Caractéristiques de l'étude

#### Méthodes et outils de l'ACV :

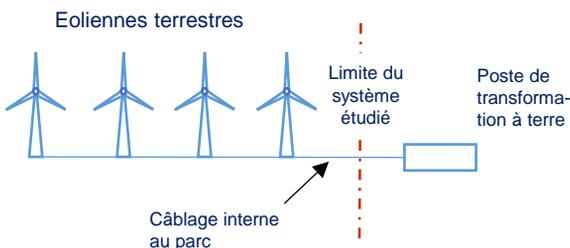
- Normes : ISO 14040 – 44
- Logiciel : SimaPro v 8.0.4, 2014
- Base de données : Ecoinvent v 2.02 + inventaires spécifiques
- Méthodes de caractérisation reconnues par la Commission Européenne et l'ADEME : ILCD 2011 Midpoint v 1.03, EDIP 2003 pour l'indicateur déchets, indicateur sur l'eau (water scarcity) de Boulay et al. 2011, CED v 1.8

### Revue critique de l'ACV de l'éolien terrestre

## Unité fonctionnelle

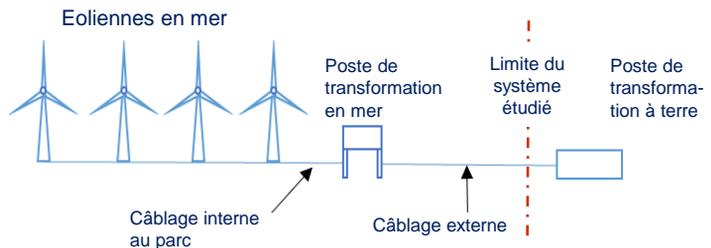
Sur terre

«1 kilowattheure issu de la capacité de production éolienne française terrestre en 2013, délivré sur le réseau électrique, avec un facteur de charge moyen calculé sur les 5 dernières années (2010-2014), pour une durée de vie de parc de 20 ans»



En mer

«1 kilowattheure issu de la capacité de production éolienne française maritime entre 2020 et 2023, délivré sur le réseau électrique, avec un facteur de charge moyen fondé sur les estimations futures, pour une durée de vie de parc de 20 ans»





# Indicateurs

## Méthodologie

L'étape d'évaluation des préjudices portés à l'environnement consiste à traduire les consommations de matières ou d'énergies puisées dans l'environnement et les rejets (appelés flux élémentaires) en impacts environnementaux potentiels. Ces indicateurs permettent de montrer l'impact du sujet étudié sur les différents milieux naturels (air, sol, milieux maritimes).

D'autres indicateurs sont également utilisés : ce sont les indicateurs de flux. Ils permettent de quantifier les quantités de ressources ou d'énergie consommées, ou de déchets générés.

## Catégories d'impact

### Acidification



L'acidification est une augmentation de l'acidité d'un sol ou d'un cours d'eau à cause des activités humaines, par le biais de pluies acides par exemple.

### Changement climatique (émission de CO<sub>2</sub>)



Les gaz à effet de serre (GES) sont les gaz qui ont la capacité d'absorber les radiations infrarouges provenant de la Terre, d'augmenter l'effet de serre et d'accentuer le réchauffement de la température à la surface de la Terre.

Les émissions de GES sont données en équivalence CO<sub>2</sub> (équivalence en pouvoir de réchauffement global).

### Utilisation des sols



Cette catégorie d'impact traite des différentes conséquences de l'utilisation et de la transformation du territoire par l'homme. Les surfaces artificialisées ou imperméabilisées sont considérées temporairement non disponibles pour remplir d'autres fonctions écosystémiques. Pour exprimer un indicateur, ces pertes sont ramenées à un équivalent de diminution de la matière organique dans le sol.

## Indicateurs de flux

### Consommation d'eau



Cette catégorie est liée à la raréfaction de l'eau. L'indicateur caractérise la consommation globale d'eau ainsi que sa baisse de fonctionnalité pour des utilisateurs humains.

### Demande cumulée en énergie non renouvelable (DCE non renouvelable)



Cet indicateur englobe toutes les sources d'énergie issues de ressources limitées disponibles sur la planète et épuisables à l'échelle humaine. Les ressources énergétiques non renouvelables que nous utilisons et qui ne seront pas remplacées dans un délai raisonnable sont donc considérées comme "épuisables", c'est-à-dire non disponibles pour les générations futures.

### Indicateur de déchets



Les flux de déchets sont divisés en trois catégories qui ont été réunis en un seul indicateur ici. Les déchets en vrac (*bulk waste* en anglais), les déchets dangereux (*hazardous waste*) et les déchets radioactifs (*radioactive waste*)

## Effizienz énergétique

### Retour énergétique

Le retour énergétique permet d'obtenir le taux de rendement énergétique, c'est-à-dire en combien de temps la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie.

Expression du retour énergétique :

$DCE / \text{Energie produite en moyenne en un mois}$

### Facteur de récolte

Le facteur de récolte permet de connaître le nombre de fois que l'énergie est amortie, c'est-à-dire le nombre de fois que la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie.

Expression du facteur de récolte :

$\text{Energie totale produite} / DCE$



# Eolien terrestre

## Parc éolien représenté

Les données récoltées et utilisables concernent 3658 éoliennes, pour une capacité totale de 7111 MW, représentant 87,2 % du parc effectif en 2013

## Hypothèses de modélisation

### A Fabrication

- Rotor : mélange fibres de verre/époxy
- Nacelle : prise en compte des technologies de la génératrice (asynchrone, synchrone à rotor bobiné ou synchrone à aimants permanents); inventaire recomposé concernant la masse d'aimants permanents
- Mât : distinction béton ou acier (modèle utilisé : acier peu allié)
- Fondation : type gravitaire utilisé, masses extrapolées des données récoltées

### B Installation des parcs

- Transport routier : Nacelle / Rotor : 1025 km ; Mât : 600 km ; Fondation : 50 km béton, 600 km acier
- Assemblage : 0,5 kWh / kg assemblé d'éolienne, Ecoinvent
- Transformation des sols : données Ecoinvent sur la base d'une machine 800 kW
- Route d'accès : 10 km par parc (données Ecoinvent)
- Raccordement réseau : 1 km de câble par éolienne (données Ecoinvent)

### C Utilisation et maintenance

- Changement de 15 % de la nacelle et une pale de rotor (d'après P. Padey, 2013)
- Transport agent de maintenance : 2160 km / an (données Ecoinvent)

### E Fin de vie

- Acier, fonte, cuivre, aluminium : 90 % recyclé, 10 % enfouis
- Aimant permanent : 100 % enfouis
- Plastiques, composites (fibres de verre – époxy) : 100 % incinéré
- Béton : 100 % recyclé
- Transport des matériaux en fin de vie : routier 200 km, sauf le béton 50 km

## Résultats de l'ACV

### Impact sur le changement climatique (émission de CO<sub>2</sub>) et demande cumulée en énergie

Le taux d'émission du parc français est de **12,7 g CO<sub>2</sub> eq/kWh** (valeur similaire avec celles données par le GIEC ou les autres études académiques). Le taux d'émission est faible par rapport à celui du mix français, estimé à 79 g CO<sub>2</sub>/kWh (année de référence 2011). L'éolien terrestre est particulièrement efficace : la demande cumulée en énergie correspond à 12 mois de production (temps de retour énergétique de 12 mois), soit de l'ordre de 5 fois moins que le mix électrique français en 2011.

### Impacts sur les sols, l'eau et l'air

En termes d'acidification, l'éolien est moins impactant que le mix électrique global (voir figure ci-contre).

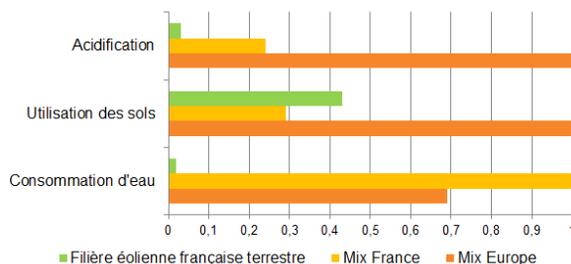
En termes d'utilisation des sols, par manque de données l'impact est majoré : i) on suppose que le sol ne retrouvera pas ses fonctions avant 40 ans ; ii) les chemins d'accès sont traités comme des routes et représentent ainsi 50% de l'impact total.

On observe aussi que l'éolien est remarquablement économe en eau.

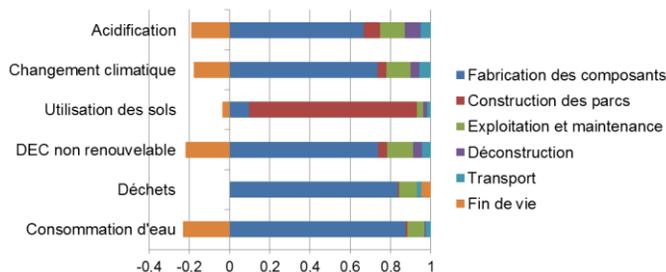
L'impact sur l'air est caractérisé par des émissions de **0,01g PM<sub>2,5</sub>eq.**, plus faibles que le mix électrique français (0,023g PM<sub>2,5</sub>eq, année 2011).

### Etapas du cycle de vie

L'étape de fabrication est la plus impactante sur tous les indicateurs mis à part sur l'indicateur d'utilisation des sols (voir figure ci-contre). La fabrication est caractérisée en premier lieu par l'énergie issue de ressources fossiles nécessaires à la fabrication des composants. Les matériaux énergivores sont l'acier, présent en grande quantité dans les nacelles et les mâts dont le recyclage permet une grande réduction de l'impact, et les différents plastiques présents dans les pales et les nacelles avec notamment une grande partie de composites fibres de verres/époxy incinérées en fin de vie.



(valeurs relatives pour 1kWh d'électricité produite)





# Eolien maritime

## Parc éolien représenté

Les 6 sites résultant des appels d'offres sont pris en compte, soit 424 éoliennes représentant 2916 MW.

## Hypothèses de modélisation

### A Fabrication

- Rotor : mélange fibres de verre/époxy
- Nacelle : génératrice synchrone à aimants permanents; inventaire recomposé concernant la masse d'aimants permanents
- Mât : distinction béton ou acier (modèle utilisé : acier peu allié)
- Fondation : type jacket utilisé sur le modèle Adwen ; monopieu et gravitaire sur le modèle Alstom

### B Installation des parcs

- Les transports des machines sont calculés en fonction des localisations de chaque parc
- Levage et montage : données des bilans carbone fournis par les constructeurs
- Transformation des sols : données Ecoinvent sur la base d'une machine 2 MW en mer
- Pas de route d'accès
- Raccordement réseau : 1 km de câble 32kV par éolienne et 20 km de câble 150kV par parc

### C Utilisation et maintenance

- Consommation des bateaux de maintenance : 7500 l de fioul par éolienne par an

### D

### E Fin de vie

- Acier, fonte, cuivre, aluminium : 90 % recyclé, 10 % enfouis
- Aimant permanent : 100 % enfouis
- Plastiques, composites (fibres de verre – époxy) : 100 % incinéré
- Béton : 100 % recyclé
- Transport des matériaux en fin de vie : maritime 20 km, routier 200 km, sauf le béton 50 km

## Résultats de l'ACV

### Impact sur le changement climatique (émission de CO<sub>2</sub>) et demande cumulée en énergie

Le taux d'émission du parc français est estimé à **14,8 g CO<sub>2</sub> eq/kWh**. Cette valeur est en moyenne 20% plus faible que celle donnée par les constructeurs des parcs éoliens en mer : la différence est essentiellement due au manque de précision sur les données des phases de construction et de démantèlement. Le taux d'émission reste faible par rapport à celui du mix français, estimé à 79 g CO<sub>2</sub>/kWh (année de référence 2011). L'éolien en mer est particulièrement efficace : la demande cumulée en énergie correspond à 14 mois de production (temps de retour énergétique de 14 mois).

### Impacts sur l'eau et l'air

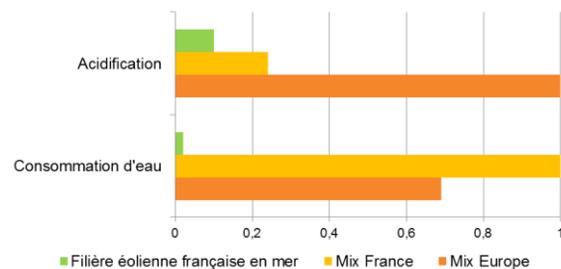
L'indicateur d'acidification de l'éolien en mer n'est pas aussi bon que celui de l'éolien terrestre, en raison de la combustion de carburant par les navires de construction et de maintenance ; il reste néanmoins plus faible que celui du mix électrique global (voir figure ci-contre).

L'éolien en mer reste remarquablement économe en eau.

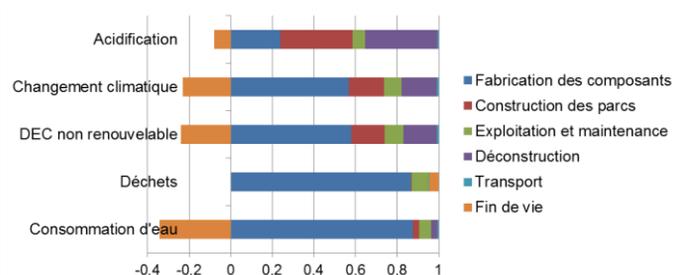
L'impact sur l'air est caractérisé par des émissions de **0,015g PM<sub>2,5</sub>eq.**, plus faibles que le mix électrique français (0,023g PM<sub>2,5</sub>eq, année 2011).

### Etapas du cycle de vie

Comme l'éolien terrestre, l'impact de la filière éolienne maritime provient en majeure partie de l'étape de fabrication et de l'énergie nécessaire à la construction des composants. Cependant cette étude montre une augmentation de la part d'impact des étapes de maintenance et de construction et déconstruction des parcs, en raison de la quantité de carburants utilisée par les différents navires.



(valeurs relatives pour 1kWh d'électricité produite)





# Ressources

## La problématique des ressources en ACV

La consommation de ressources permet de satisfaire les besoins humains avec la production des biens et services qui permettent de répondre aux attentes des individus. En contrepartie l'exploitation des ressources induit directement ou indirectement des émissions dans l'air, l'eau et le sol qui génèrent des dommages environnementaux.

Les dommages environnementaux sont évalués par l'ACV. Mais celle-ci ne donne pas d'indicateur d'impact sur les ressources elles-mêmes, et ne peut donc pas servir d'aide à la décision pour limiter la pression sur les ressources sensibles. Cette problématique permet de faire le lien avec l'économie circulaire : une meilleure exploitation des ressources doit permettre d'une part une diminution des impacts liés aux produits et services, mais aussi de réduire la charge économique de l'extraction et du transport des ressources et matériaux.

## Quelle méthode pour évaluer les pressions sur les ressources ?

Plusieurs méthodes ont été développées, répondant à des préoccupations différentes.

### Approche Recyclabilité

Évaluation du recyclage des métaux en se basant sur les taux réels de matières recyclées dans l'industrie. Cette approche est limitée à la quantification de flux de matière sans tenir compte des impacts.

### Méthode CML

Méthode développée pour l'ACV, prenant en compte les gisements disponibles et les taux d'exploitation pour évaluer l'impact sur les ressources. CML est basé sur le ratio entre les quantités de ressources consommées annuellement et le gisement disponible. Seule la rareté de la ressource est prise en compte.

### Méthode COMPOSITE

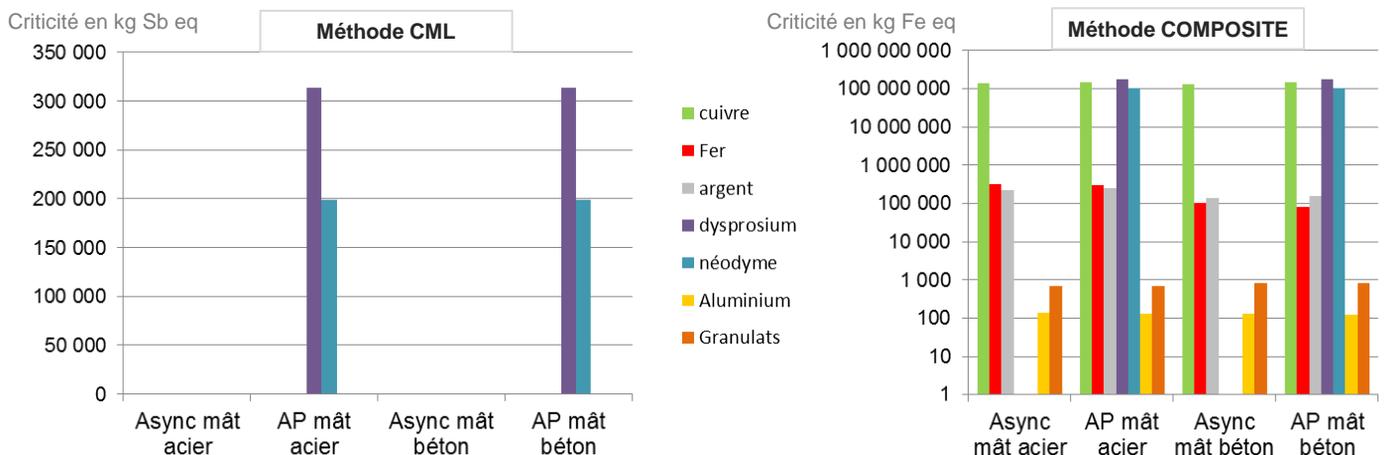
Calcul d'un indicateur intégrant les caractéristiques suivantes de la ressource :

- Disponibilité (basée sur la méthode CML)
- Criticité (*technique; économique; politique*) -
- Recyclabilité
- Substituabilité

Cette méthode est utilisée pour présenter les résultats ci-dessous. Les facteurs de caractérisation ont été développés pour les 10 ressources concernées.

## Résultats sur les principales ressources minérales utilisées dans l'éolien

Les 9 principales ressources utilisées pour construire les éoliennes sont : l'aluminium, l'argent, le cobalt, le cuivre, le dysprosium, le fer, le néodyme, les sables et les granulats. Sur une base d'éolienne de 2,5 MW, une comparaison a été faite de 4 technologies de machines électriques : classique à bobinage (Async) ou aimants (AP) avec des mâts différents (Béton ou acier). 2 méthodes ont été comparées : CML (criticité) et COMPOSITE



Sur la base de la seule rareté de la ressource (Méthode CML), seules les terres rares apparaissent (ci-dessus à gauche). Si l'on prend en compte les facteurs économiques et politiques, mais aussi la recyclabilité et la substituabilité, le résultat est plus contrasté (ci-dessus à droite) : le cuivre apparaît avec une criticité importante. Certains éléments émergent, en particulier le fer et l'argent : le premier pour la criticité économique moyenne conjuguée à une masse importante de fer (sous forme d'acier et de fonte principalement) ; le second pour une criticité importante. Enfin, d'autres éléments, tels que le cobalt présent dans les alliages, ont également des valeurs de criticité élevées mais sont utilisés en trop petite quantité (de l'ordre du gramme) et ne ressortent pas dans l'analyse de criticité.



# Conclusion

## Lecture des impacts

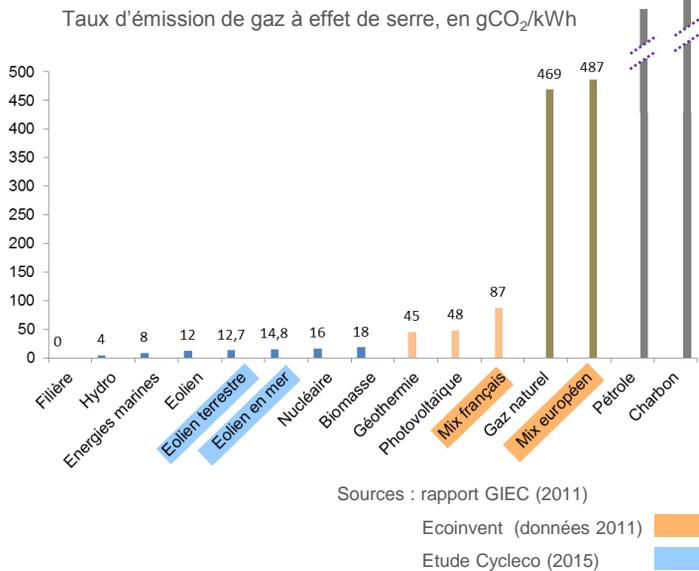
Dans cette étude, les impacts environnementaux sont calculés pour l'ensemble des parcs éoliens terrestres et maritimes français, tout au long de leur durée de vie. A la lecture des impacts, les principaux résultats sont :

### • Confirmation des faibles émissions de CO<sub>2</sub> :

Eolienne terrestre : taux d'émission de 12,7 g CO<sub>2</sub> eq / kWh

Eolien en mer : taux d'émission de 14,8 g CO<sub>2</sub> eq / kWh

Ces émissions caractérisant les parcs français sont analogues à celles rapportées par les études internationales, et se comparent aux autres filières de production d'électricité dans la figure ci-dessous.



### • Faibles impacts sur les compartiments air, sol et eau

### • Moyen efficient de produire de l'énergie

Eolien terrestre : le temps de retour énergétique est de 12 mois et le facteur de récolte de 19.

Eolien en mer : le temps de retour énergétique est de 14 mois et le facteur de récolte de 17.

## Interprétation

La phase de fabrication des composants est la principale source des impacts, notamment en raison de la consommation d'énergie. Les autres conclusions sont :

### Pour l'éolien terrestre :

- L'acier utilisé en particulier pour les mâts, mais aussi dans la nacelle ou les fondations, représente une contribution importante.
- Le facteur de charge est un autre paramètre de première importance. Une variation de 10% du facteur de charge conduit à une variation de l'ordre de 10% des impacts.
- La durée de vie a été fixée à 20 ans par convention. Elle reste un paramètre important, qui fait varier chacun des indicateurs de manière presque proportionnelle.
- Transport des pièces : un scénario moyen a été modélisé pour un approvisionnement à partir d'Europe de l'Ouest. La contribution du transport aux impacts est faible. Le doublement des distances implique une augmentation des impacts en général de l'ordre de 10%.

### Pour l'éolien en mer :

L'interprétation est plus complexe en raison des incertitudes plus importantes. L'énergie nécessaire à la fabrication des composants reste l'impact le plus important sur la quasi-totalité des indicateurs. Les autres spécificités sont :

- Les nacelles ont une part plus importante dans la contribution de l'impact, ceci est dû à la présence de générateurs à aimants permanents dans chacune des éoliennes sélectionnées. Ces aimants composés de terres rares sont très énergivores et ne sont pas recyclés efficacement aujourd'hui.
- Les phases de construction et de déconstruction des parcs ont un impact plus important que dans l'éolien terrestre, en particulier sur les indicateurs liés à l'acidification et l'eutrophisation des océans, sur l'indicateur d'émission de CO<sub>2</sub> et de DCE. Ces indicateurs subissent les conséquences de la grande consommation de carburant des navires sur les parcs et démontrent l'importance de ces étapes de cycle de vie directement liées aux parcs maritimes.

## Perspectives

L'évolution de l'éolien terrestre doit permettre d'équiper des sites aux conditions de vent plus diversifiées, mais à facteur de charge équivalent ou supérieur aux parcs éoliens actuels. Cette évolution est réalisée en installant des éoliennes avec des mâts plus hauts et des rotors avec une surface de balayage supérieure. Leur évaluation environnementale nécessite d'approfondir les inventaires existants en particulier sur les aciers utilisés. L'amélioration des performances environnementales de la filière passe également par le développement de l'économie circulaire.

L'éolien en mer ne démontre pas d'amélioration de l'impact sur les différents indicateurs étudiés (modulo les incertitudes actuelles sur les données d'entrée). Le temps de retour énergétique et le taux de CO<sub>2</sub>/kWh sont légèrement supérieurs à l'éolien terrestre dans cette étude, mais restent inférieurs à ceux de la majorité des moyens de production électrique. La criticité des ressources en terres rares est également un point d'attention pour le développement de l'éolien en mer. Cependant la diversification de l'approvisionnement énergétique offert par cette filière ainsi que la marge de progression technologique sont deux éléments-clés qui donnent à l'éolien en mer toute sa place dans la transition énergétique.

Enfin, cette étude révèle le besoin de consolider les inventaires de cycle de vie des parcs en mer afin de pouvoir consolider leur évaluation environnementale.

## L'ADEME EN BREF

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

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



**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

Etude réalisé par :

18 Avenue Roger Salengro  
01500 Ambérieu-en-Bugey



**CYCLEeco**

ADEME  
27 rue Louis Vicat  
75015 Paris

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)