



# FICHE 42 Bilan carbone et recyclage d'un parc éolien en mer

## Messages clés:

- Un parc éolien en mer posé a un facteur d'émission entre 13 et 19 g  $\text{éqCO}_2$  / kWh et un temps de retour énergétique estimé à 14 mois. Pour les parcs éoliens en mer flottants, les facteurs d'émission devraient se stabiliser autour de 19,5 g  $\text{éqCO}_2$  / kWh pour les futurs parcs commerciaux.
- Dans tous les cas, les parcs éoliens en mer flottants et posés ont des intensités carbonées largement inférieures aux moyennes des mix électriques français ou européen, contribuant ainsi aux objectifs de décarbonation.
- La quasi-totalité des composants des éoliennes pourront être recyclés ou réutilisés.

## Les principaux composants d'une éolienne

Les éoliennes en mer sont **constituées en majorité de parties métalliques** comme le mât et le rotor, qui représentent plus de 90 % de leur poids. Les 10 % restants, notamment les pales, sont faits de matériaux composites, c'est-à-dire constitués d'un assemblage de matériaux différents comme la fibre de verre et de carbone, de résines polyester ou d'époxy.

## 1. Les principes du bilan carbone d'un parc éolien en mer

Le bilan carbone d'un parc éolien en mer mesure la quantité de gaz à effet de serre émise pendant toute la durée de vie du parc, depuis sa conception jusqu'à son démantèlement à l'issue de son exploitation : cela comprend notamment les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des composants du parc éolien, au transport de ces composants et à leur installation, à l'exploitation et à la maintenance du parc, puis à la remise en état du site et au traitement des éléments en fin de vie. Le bilan carbone est exprimé en tonnes équivalent  $\text{CO}_2$  (ou t  $\text{éqCO}_2$ ). Une tonne équivalent  $\text{CO}_2$  correspond à la « masse de  $\text{CO}_2$  qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre ». Par exemple, une tonne de méthane vaut près de 32 t  $\text{éqCO}_2$ .

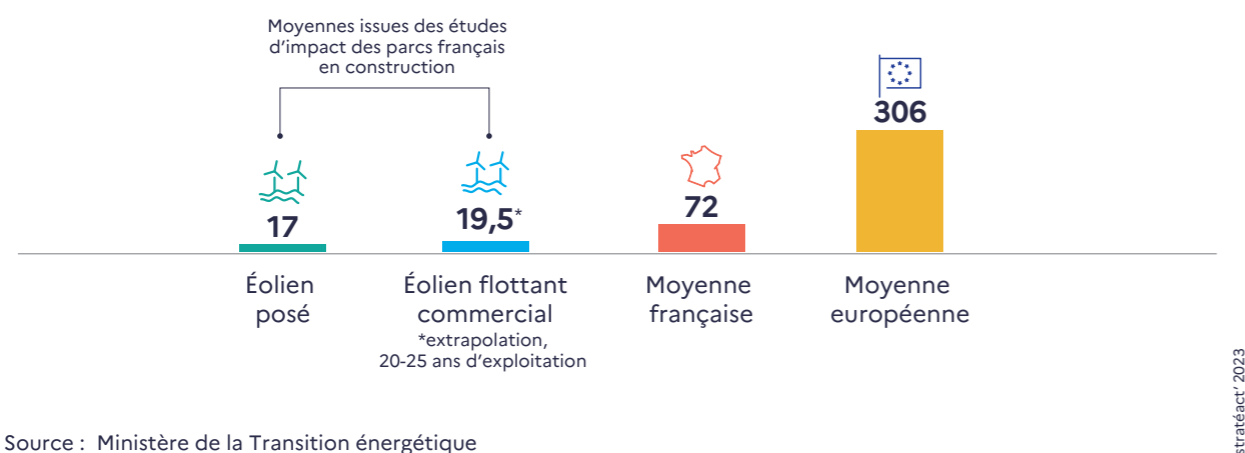
Pour un parc éolien en mer, le bilan carbone permet de déterminer le facteur d'émission, qui indique la quantité de  $\text{CO}_2$  émise par un kWh d'électricité produite par le parc, exprimé en gramme d'équivalent  $\text{CO}_2$  par kWh produit (g  $\text{éqCO}_2$  / kWh). Cet indicateur permet des comparaisons entre différents dispositifs de production d'électricité.

## 2. Le bilan carbone des éoliennes en mer flottantes et posées dans le mix électrique français et européen

Les parcs éoliens en mer flottants et posés ont des intensités carbonées largement inférieures aux moyennes des mix électriques français et européens, et de même ordre que les autres moyens de production d'électricité décarbonés en France.

À l'avenir, ces technologies décarbonées contribueront donc pleinement à la réduction des émissions de GES nécessaires à la production d'électricité en France et en Europe.

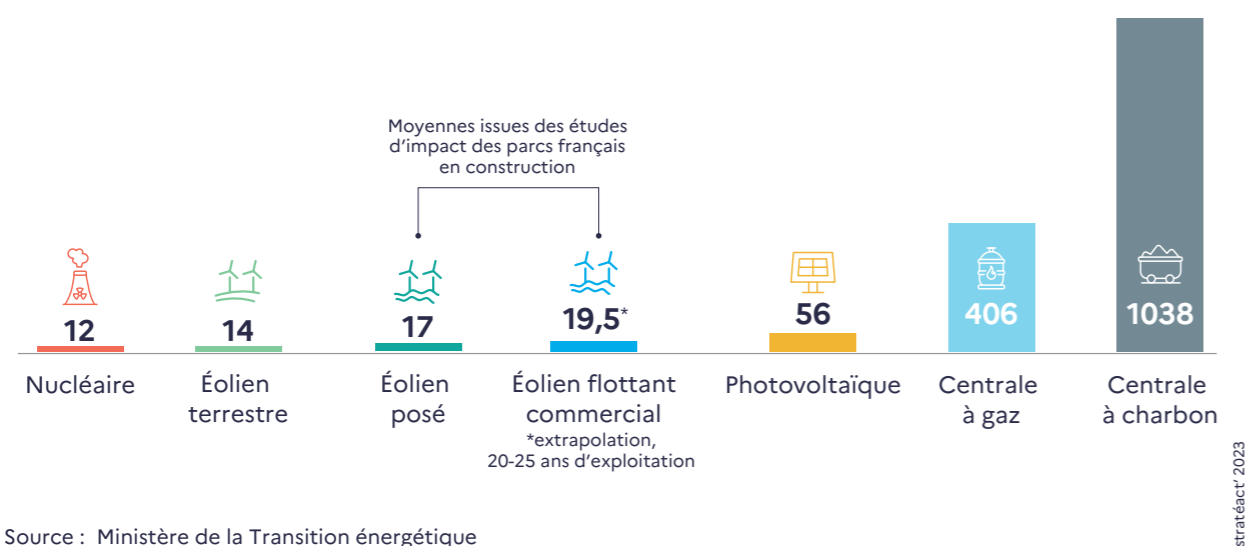
### Émissions de gaz à effet de serre (gCO<sub>2</sub>eq) pour un kWh d'électricité



Source : Ministère de la Transition énergétique

stratéact 2023

### Émissions de gaz à effet de serre (gCO<sub>2</sub>eq) pour un kWh d'électricité



Source : Ministère de la Transition énergétique

stratéact 2023

## 3. Le bilan carbone d'un parc éolien en mer posé

La filière de l'éolien en mer étant émergente en France, les données sur les bilans carbonés des projets ne sont pas très nombreuses. Toutefois, les émissions de gaz à effet de serre des premiers parcs éoliens en mer posés (Saint-Brieuc, Dieppe-Le-Tréport, Courseulles-sur-Mer, Fécamp et Saint-Nazaire) ont été calculées dans les études d'impacts de ces projets.

Selon le nombre d'éoliennes, leur puissance unitaire et le temps d'exploitation, le bilan carbone des parcs éoliens en mer posés français varie comme suit :

- de 554 000 à 734 000 tonnes éqCO<sub>2</sub> émises ;
- un facteur d'émission entre 13 et 19 g éqCO<sub>2</sub>/ kWh produit ;
- un temps de retour de 4 ans et demi à 6 ans et demi par rapport au mix électrique français moyen (72 g éqCO<sub>2</sub>/ kWh).

### Comparaison des bilans carbonés des parcs éoliens en mer posés en construction en France

Nom du parc	Dieppe-Le Tréport	Courseulles-sur-Mer	Fécamp	Saint-Brieuc	Saint-Nazaire	Moyenne
Puissance totale (MW)	496	450	498	500	480	
Temps d'exploitation (ans)	25	25	25	25	25	25
Facteur d'émission (g éqCO <sub>2</sub> /kWh)	13,7	18,5	13,3	15,8	19	17

Ces chiffres aboutissent à une moyenne de 16 g équivalent CO<sub>2</sub> émis par kWh d'électricité produit. L'éolien en mer posé est ainsi peu émetteur de gaz à effet de serre par rapport aux autres sources d'électricité existantes (cf. partie 2).

Le temps de retour énergétique, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle un parc aura produit la quantité d'énergie qui a été nécessaire à sa production, est estimé à environ 14 mois. Cela signifie donc qu'un parc éolien en mer produit environ 20 fois plus d'énergie que sa construction en a consommé.

## 4. Le bilan carbone des fermes pilotes d'éoliennes flottantes

Nous ne disposons pas encore de bilan carbone établi pour les parcs éoliens flottants de taille commerciale puisqu'aucun projet équivalent n'a encore été développé en France.

Le bilan carbone des fermes pilotes (d'environ 30 MW) est fourni dans leur étude d'impact :

- Éoliennes flottantes de Groix et Belle-Île : le bilan des émissions de gaz à effet de serre présenté dans l'étude d'impact donne une valeur de 36,4 g éqCO<sub>2</sub>/ kWh ;
- EolMed - Gruissan : l'analyse du cycle de vie du projet EolMed - Gruissan dans son ensemble (fabrication, construction, exploitation et démantèlement) a révélé que les émissions de gaz à effet de serre seront de l'ordre de 47,3 g éqCO<sub>2</sub>/ kWh d'électricité en entrée de réseau RTE<sup>1</sup> ;
- Éoliennes flottantes dans le golfe du Lion : sur les vingt années d'exploitation de la ferme pilote, le facteur d'émission du projet atteint de 24,1 g éqCO<sub>2</sub>/ kWh<sup>1</sup> ;
- Provence Grand Large : sur les vingt années d'exploitation de la ferme pilote, le facteur d'émission du projet atteint de 52 g éq. CO<sub>2</sub>/ kWh, raccordement compris (câbles inter-éoliens, câble export et câbles terrestres)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> À titre d'information, des analyses sur les émissions de gaz à effet de serre évitées avaient été réalisées par l'ADEME sur les éoliennes terrestres. Ces dernières indiquaient que lorsqu'une éolienne fonctionnait, son électricité se substituait pour 77 % à de l'électricité produite par des centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles situées en France et à l'étranger. Ainsi chaque kWh d'éolien terrestre permettait d'éviter 430 g de CO<sub>2</sub> en France et en Europe.

Lors du débat public relatif aux éoliennes flottantes en Méditerranée, la CPDP a fait produire une étude bibliographique afin de consolider les données existantes sur la performance environnementale de l'éolien flottant en France et à l'étranger<sup>2</sup>.

Sur la base des cinq parcs éoliens flottants considérés (quatre en France cités ci-dessus, une en Écosse), cette étude affiche une moyenne de 39 gCO<sub>2</sub>e par kWh d'électricité produite hors maintenance curative pour ces fermes pilotes. Elle met notamment en lumière la variabilité des émissions des GES induites par les différentes phases (extraction et transformation des matériaux, installation, exploitation/maintenance, fin de vie) qui peuvent passer du simple au double selon les projets.

Les données analysées ont été extrapolées pour estimer le bilan carbone d'éventuels parcs commerciaux d'éoliennes flottantes. L'étude conclut qu'un parc éolien flottant commercial de première génération (hors maintenance curative) émettrait en moyenne 19,5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, en prenant comme hypothèse une durée d'exploitation de 20-25 ans.

## 5. L'effet d'un parc éolien en mer sur les émissions du système électrique

Lorsqu'elles fonctionnent, les éoliennes françaises se substituent à des installations de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles en France ou en Europe (dont la part demeure extrêmement importante). L'électricité produite dispose en effet d'un coût de production marginal nul et est donc plus compétitive que l'électricité issue des centrales de production utilisant des combustibles d'origine fossile.

Ainsi, le gestionnaire de réseau public de transport RTE a montré que les capacités de production éolienne et photovoltaïque ont permis d'éviter l'émission de 22 MtCO<sub>2</sub> en 2019, en se substituant à des moyens de production fossiles en France et dans d'autres pays d'Europe.

Les analyses réalisées par le gestionnaire de réseau public de transport RTE ont montré que le système électrique français est en mesure d'intégrer de nombreuses installations de production d'électricité non pilotables (éoliennes, panneaux solaires, etc.) sans nécessiter de nouvelle installation de production utilisant des combustibles d'origine fossile compte tenu des outils de flexibilité existant. Ainsi, l'installation d'éoliennes en mer ne nécessitera pas de construction de nouvelles centrales thermiques.

Le bilan prévisionnel publié par RTE en mars 2021 indique que l'atteinte même partielle des objectifs de la PPE et de la SNBC aura permis de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> en France de l'ordre de 30 à 40 MtCO<sub>2</sub> par an à l'horizon 2030 (-10 MtCO<sub>2</sub> par le système électrique lui-même, -20 à -30 MtCO<sub>2</sub> du fait des transferts d'usages vers l'électricité). Ces émissions ne seront pas délocalisées vers nos voisins européens. L'empreinte carbone des importations (déjà faible et de l'ordre de 1 MtCO<sub>2</sub>) continuera de baisser. Mieux, la France sera exportatrice et contribuera ainsi à la baisse des émissions au niveau européen (de 30 à 40 MtCO<sub>2</sub> par an à l'horizon 2030).

## 6. Le recyclage de l'éolienne

Le développeur éolien est responsable du démantèlement et du recyclage des éoliennes. Le démantèlement des composants des éoliennes s'effectue au port. La récupération des matériaux critiques contenus dans les turbines est ainsi facilitée. Le recyclage des éoliennes est quasi intégral :

- Les parties métalliques comme le mât et le rotor constituent plus de 90 % du poids des éoliennes : leur recyclage est organisé dans les filières conventionnelles déjà existantes pour les éoliennes terrestres. L'acier notamment se recycle très bien, la demande étant en constante augmentation<sup>3</sup>.
- Le défi le plus important pour le recyclage des éoliennes concerne les 10 % du poids restants, notamment les pales en matériaux composites, ou encore les aimants. Des filières dédiées de gestion de ces déchets existent déjà pour partie et devront être renforcées.

Les exigences relatives au recyclage et au démantèlement des éoliennes en mer sont fixées dans les autorisations et dans les cahiers des charges des appels d'offres des projets.

Il n'y a pas encore eu de démantèlement impliquant des éoliennes en mer. À noter que le gouvernement a fixé des objectifs ambitieux de valorisation et recyclage des matériaux des installations classées lors de leur démantèlement, qui concernent notamment l'éolien terrestre<sup>4</sup> où au moins 95 % du poids des éoliennes devra être recyclé dès 2024.

Concernant les pales des éoliennes, des avancées technologiques sont à prévoir dans le recyclage des matériaux composites. Une possibilité consiste à utiliser le broyat de pales pour fabriquer de nouveaux matériaux composites. C'est notamment la solution mise au point par l'université de Washington en collaboration avec General Electric (GE) et Global Fiberglass Solutions Inc (GFSI) de Seattle. Le produit obtenu à partir du broyage des pales serait aussi résistant que les composites à base de bois. De très nombreux usages peuvent être envisagés comme des dalles de sol, des glissières de sécurité le long des axes routiers, des plaques d'égout, des skateboards, des meubles ou des panneaux pour le bâtiment. En moins d'un an, GFSI a recyclé 564 pales selon cette méthode, et l'entreprise estime qu'elle pourrait transformer en produits utiles plus de 20 000 tonnes de déchets de matériaux composites dans les deux années à venir.

Des travaux sont en cours pour optimiser le recyclage des parcs éoliens en mer ou concevoir des pales 100 % recyclables. En septembre 2020, un projet de recherche nommé « ZEBRA » a été lancé par l'Institut de Recherche Technologique Jules Verne, en partenariat avec un consortium de six acteurs de l'énergie éolienne. Leur objectif est de fabriquer une éolienne aux matériaux et aux composants 100 % recyclables d'ici mi-2024<sup>5</sup>.

Le fabricant Siemens a depuis annoncé avoir développé une pale 100% recyclable (qui sera utilisée une partie des éoliennes du parc de Courseulles-sur-Mer) et Vestas a développé un procédé permettant de rendre ses pales 100% recyclables (même celles déjà développées).

Les projets éoliens en mer issus de l'exercice de planification seront incités à bénéficier de technologies 100% recyclables.

L'État considère le recyclage comme un enjeu majeur des projets éolien en mer. À ce titre, les cahiers des charges des procédures de mise en concurrence actuelles imposent des critères de recyclabilité forts. Par exemple, le taux de recyclage des pales est l'un des critères de notation dans les derniers appels d'offres lancés par le ministère de la transition énergétique. Les exigences de recyclage peuvent également faire l'objet de critères d'éligibilité des offres.

### Retour d'expérience européen sur le démantèlement et le recyclage

Le développeur éolien en mer anglais, E.ON, a démantelé en mars 2019, deux éoliennes en mer posées de 2 MW du parc de Blyth en Angleterre. Le démantèlement de ces deux éoliennes a duré environ 6 semaines. Une des turbines a été recyclée et réutilisée comme pièces de rechange tandis que la seconde sera utilisée à des fins de formations.

Concernant l'éolien flottant, le prototype WF1 ou WindFloat 1 (éolienne de 2 MW installée sur un flotteur semi-submersible conçu par Principle Power) a été installé le 22 octobre 2011 sur le site d'Agucadoura au Portugal, à 5 km des côtes. Après cinq années de test et une production d'électricité supérieure à 17 GWh, flotteur et turbine ont été démantelés comme prévu au cours de l'année 2016.

<sup>2</sup> BL Evolution, Analyse bibliographique des bilans carbone de l'éolien flottant, décembre 2021

<sup>3</sup> Ibidem et Observatoire de l'éolien : analyse du marché, des emplois et des enjeux de l'éolien en France, 2019, France énergie éolienne : <https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2019/11/observatoire-2019-final.pdf>

<sup>4</sup> Étude d'impact de la ferme pilote EolMed – Gruissan : ferme pilote d'éoliennes flottantes et son raccordement au réseau public d'électricité.

<sup>5</sup> Étude d'impact de la ferme pilote « Éoliennes flottantes du golfe du Lion ».



