



FICHE N°11

Quel est le bilan carbone d'un parc éolien flottant ?

LES PRINCIPAUX POINTS ABORDÉS

Cette fiche présente les données aujourd'hui disponibles pour estimer le bilan carbone d'un parc d'éoliennes flottantes en mer. Elle aborde :

- ~ les grands principes de calcul du bilan carbone : les phases du cycle de vie du projet prises en compte, l'unité de mesure utilisée et les deux indicateurs principaux, à savoir le « facteur d'émission » et « le temps de retour » qui correspond au nombre d'années après lequel le parc aura compensé ses émissions ;
- ~ les bilans carbone des parcs français d'éoliennes en mer posées tels que présentés dans les études d'impacts des différents projets en cours de réalisation ;
- ~ les bilans carbone estimatifs des fermes pilotes d'éoliennes flottantes ;
- ~ l'effet marginal du parc éolien sur les émissions de gaz à effet de serre du réseau électrique français.

Le bilan carbone mesure les émissions de gaz à effet de serre d'une activité humaine. Pour un parc éolien en mer, le bilan carbone permet notamment de déterminer le temps nécessaire pour que le parc compense, par sa production d'électricité, les émissions de gaz à effet de serre engendrées tout au long de son cycle de vie. Ce temps de retour dépend notamment du bouquet énergétique du pays concerné.

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 émis 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 son démantèlement, y compris à la remise en état du site et au traitement des éléments en fin de vie.

Les composants d'une éolienne flottante

Les éoliennes flottantes 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. Enfin, selon la technologie privilégiée, les générateurs contiennent 150 à 650 kg d'aimants permanents par MW de puissance installée. Ces aimants permanents sont constitués de 32 à 38 % de terres rares (29 à 32 % de néodyme, 3 à 6 % de dysprosium et moins d'1 % de praséodyme).

Pour plus d'informations, la **fiche n°17**  consacrée au démantèlement d'un parc éolien, détaille les composants d'un parc et leur recyclage.



Le bilan carbone est exprimé en tonnes équivalent CO₂.

L'expression « équivalent en dioxyde de carbone » (en abrégé : équivalent CO₂ ou éq. CO₂) est définie par la Commission d'enrichissement de la langue française en 2019 comme la « masse de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre ».

Le bilan carbone vise à calculer un indicateur, le facteur d'émission, qui indique la quantité de CO₂ émise par un kWh d'électricité produite par le parc (exprimé en gramme d'équivalent CO₂ par kWh produit, g éq. CO₂/kWh). Cet indicateur permet des comparaisons entre différents dispositifs de production d'électricité.

L'objectif du bilan carbone est également de calculer le temps de retour du parc, c'est-à-dire le nombre d'années au-delà duquel le parc aura totalement compensé les émissions de gaz à effet de serre dont il est ou sera l'origine.

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 carbone des projets français ne sont pas très nombreuses. Toutefois, les émissions de

gaz à effet de serre des premiers parcs éoliens en mer posés (Yeu-Noirmoutier, Saint-Brieuc, Dieppe-Le Tréport, Courseulles-sur-Mer, Fécamp et Saint-Nazaire) ont été calculées dans les études d'impacts de ces projets.

Quel est le bilan carbone d'un parc éolien ?

Comparaison du bilan carbone de la production d'électricité en France, en Europe et par un projet de parc éolien en mer (exemple du parc éolien au large de Fécamp)

Émission de gaz à effet de serre, exprimée en g éqCO ₂ /kWh produit	
Production moyenne en France	72
Production moyenne UE27	306
Production du parc éolien	14

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 754 000 tonnes éq. CO₂ émises pour des projets allant de 450 à 500 MW ;
- ~ un facteur d'émission entre 14 et 18 g éq. CO₂/kWh produit ;
- ~ un temps de retour de 4,5 à 6 ans en France par rapport au mix électrique moyen.

Comparaison du bilan carbone de la production d'électricité en France par un projet de parc éolien en mer

Nom du parc	Dieppe et Le Tréport	Îles d'Yeu-Noirmoutier	Courseulles-sur-Mer	Fécamp	Baie de Saint-Brieuc	Saint-Nazaire
Nombre d'éoliennes	62	62	75	83	62	80
Puissance unitaire (MW)	8	8	6	6	8	6
Puissance totale (MW)	496	496	450	498	500	480
Temps d'exploitation (ans)	25	25	25	25	25	25
Bilan carbone du projet (t éqCO ₂)	686 449	689 954	723 000 (659 000 si valorisation des matériaux en fin de vie)	637 000 (579 000 si valorisation des matériaux en fin de vie)	554 500	637 000 (579 000 si valorisation des matériaux en fin de vie)
Facteur d'émission (g éqCO ₂ /kWh)	13,7	14,5	17,6 (avec valorisation des matériaux en fin de vie)	14 (avec valorisation des matériaux en fin de vie)	15,8	17,3 (avec valorisation des matériaux en fin de vie)
Temps de retour (ans) calculé par rapport au bouquet électrique français	5	5	5 à 6 ans	5 à 6 ans	4 ans et 5 mois	4, 5 à 6 ans

À titre de comparaison, le facteur d'émission des productions électriques renouvelables en France est estimé par l'ADEME¹ à :

~ 14,1 g éq. CO₂/ kWh pour l'éolien terrestre ;

~ 56 g éq. CO₂/ kWh pour le photovoltaïque.

Pour les énergies fossiles, le facteur d'émission en France est estimé² à :

~ 406 g CO₂/kWh pour une centrale à gaz ;

~ 1 038 g CO₂/kWh pour une centrale à charbon ;

~ 12 g éq. CO₂/ kWh³ pour une centrale nucléaire (à noter : les phases de démantèlement et de fin de vie des ouvrages ne sont pas intégrées dans les facteurs d'émission retenus).

Ainsi, le bilan carbone de l'éolien en mer posé s'avère donc relativement faible par rapport à l'ensemble des sources de production d'électricité.

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 ou dans le monde. Toutefois, le bilan carbone des fermes pilotes est fourni dans leur étude d'impact :

~ **Éoliennes flottantes de Groix et Belle-Île** (EFBGI) : le bilan des émissions de gaz à effet de serre présenté dans l'étude d'impact donne une valeur de 36,4 g éq. CO₂/ 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 éq. CO₂/ kWh d'électricité en entrée de réseau RTE⁴ ;

~ **Éoliennes flottantes dans le golfe du Lion** (EFGI) : sur les vingt années d'exploitation de la ferme pilote, le facteur d'émission du projet atteint de 24,1 g éq. CO₂/ kWh. Le temps de retour climatique atteint 5,95 années⁵.

~ **Provence Grand Large** : sur les vingt années d'exploitation de la ferme pilote, le facteur d'émission du projet atteint de 52 g éq. CO₂/ kWh, raccordement compris (câbles inter-éoliens, câble export et câbles terrestres)⁶.

Ainsi, pour les fermes pilotes, d'après les chiffres publiés au moment de l'étude d'impact, le facteur d'émission d'une ferme éolienne seule (hors raccordement) est de l'ordre de 36 g CO₂ éq/kWh (moyenne des projets EFBGI, EolMed, EFGI). Toutefois, on observe une forte variabilité (plage de variation de 11 g CO₂ éq/kWh) qui s'explique par les différentes technologies utilisées pour les flotteurs et les ancrages, ainsi que des conditions de vent différentes qui favorisent les sites plus venteux. En fonction de la géométrie retenue pour les flotteurs, leur masse d'acier ou de béton peut varier fortement. La fiche n° 15 détaille les caractéristiques de flotteurs et du parc d'éoliennes flottantes.

À partir des chiffres de l'étude d'impact du projet EFGI, on estime le temps de retour climatique des différentes fermes pilotes entre 5 et 13 années.

Ces données sont néanmoins à manier avec précaution en raison du caractère expérimental des fermes pilotes. En effet, du fait de leur petite taille et de leur faible puissance, les fermes pilotes d'éoliennes flottantes auront un impact carbone plus important que les futurs parcs commerciaux.

L'EFFET SUR LES ÉMISSIONS DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE D'UN PARC ÉOLIEN EN MER

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)⁷. L'électricité produite dispose en effet d'un coût de production marginal nul, le vent étant naturellement gratuit, et est donc plus compétitive que l'électricité issue des centrales de production utilisant des combustibles d'origine fossile.

¹ http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm

² Rapport Base Carbone de l'ADEME de 2014 : [https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/\[Base%20Carbone\]%20Documentation%20g%C3%A9n%C3%A9rale%20v11.0.pdf](https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/[Base%20Carbone]%20Documentation%20g%C3%A9n%C3%A9rale%20v11.0.pdf)

³ Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023.

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

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

⁶ https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/28465/168813/file/12-4_PGL_Memoire_reponse_Avis_Ae_PEOPGL_RTE.pdf

⁷ 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 situés en France et à l'étranger. Ainsi chaque kWh d'éolien terrestre permettait d'éviter 430 g de CO₂ en France et en Europe.



DÉBAT PUBLIC
PROJET D'ÉOLIENNES FLOTTANTES
EN MÉDITERRANÉE ET LEUR RACCORDEMENT

Enfin, 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 existants⁸. Ainsi, à l'horizon de mise en service du projet, l'installation d'éoliennes en mer ne nécessitera pas de construction de nouvelles centrales thermiques.

Le bilan prévisionnel publié par RTE en mars 2021⁹ indique que l'atteinte même partielle des objectifs de la PPE et de la SNBC aura permis de diminuer les émissions de CO₂ en France de l'ordre de 30 à 40 MtCO₂ par an à l'horizon 2030 (-10 MtCO₂ par le système électrique lui-même, -20 à -30 MtCO₂ 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 MtCO₂) continuera de baisser. Mieux, la France sera exportatrice et contribuera ainsi à la baisse des émissions au niveau européen (de 30 à 40 MtCO₂ par an à l'horizon 2030).

⁸ https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bp2017_complet_vf_compressed.pdf
Voir en particulier le scénario AMPERE intégrant une proportion importante d'énergie renouvelable.

⁹ <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/BP2021-rapport-perspectives-electriques-2021-2030.pdf>