



Analyse bibliographique des bilans carbone de l'éolien flottant



Au cours des différents débats publics et concertations liés à des questions énergétiques, la Commission Nationale du Débat Public (CNDP) a pu relayer la demande du public de disposer d'informations fiables et comparables sur les performances environnementales des différents modes de production d'énergie. Sur les projets de production d'énergie renouvelable (ENR), cette demande est forte du fait des doutes que le public exprime sur ces énergies lorsqu'elles sont présentées comme «propres» ou «vertes». En particulier, le bilan carbone est une donnée nécessaire pour pouvoir débattre de l'objectif principal de ces projets visant à la décarbonation du mix énergétique. La réalité et la mesure de cette décarbonation dépendent directement de cette donnée.

Au cours du débat public Eoliennes flottantes en Méditerranée (EOS), le public s'est exprimé sur la nécessité de connaître les performances environnementales de l'éolien flottant. La CPDP a organisé le 13 septembre 2021 un atelier thématique en ligne sur cette question, intitulé : « l'éolien flottant, une énergie vraiment propre ? ». Au cours de cet atelier, les chiffres présentés concernant les bilans carbone de l'éolien flottant étaient différents selon les sources, et variaient fortement d'un projet à l'autre. La base de calcul pouvait également différer (avec ou sans le raccordement) et a pu évoluer avec le temps et les choix technologiques, et enfin les projets d'éolien flottant existants à l'étranger n'étaient pas considérés. La CPDP a conclu à la nécessité d'une étude bibliographique qui puisse compléter et clarifier ces données, et fournir une base qui puisse ensuite être comparée aux autres moyens de production, mieux documentés.

La CNDP, saisie de cette demande, a décidé le 6 octobre d'engager la présente étude complémentaire, qui est publiée sur son site internet et celui du débat EOS :

www.debatpublic.fr / www.eos.debatpublic.fr

Sommaire

Périmètre de l'étude	page 3
Résultats annoncés par les ACV	page 6
Détail par phase et par élément du projet	page 7
Facteurs de sensibilité et données non prises en compte	page 10
Proposition d'une valeur moyenne pour les fermes pilotes d'éolien flottant	page 12
Passage à une utilisation commerciale	page 15
Comparaison à d'autres technologies de production électrique	page 17
Conclusions et perspectives	page 18
Annexe :	
décision CNDP 2021 / 137 / EOLIEN MEEDITERRANEE / 6	page 19

Auteurs : Charles Adrien LOUIS, Simon GAUTHIER (BL évolution)

L'éolien flottant

L'éolien flottant est un type de production d'électricité réalisé à partir d'éoliennes en mer qui sont posées sur un flotteur ancré au fond marin. Il est à distinguer de l'éolien offshore posé pour lequel l'éolienne et son socle sont directement ancrés dans le fond marin.

Les technologies utilisées pour l'éolien flottant peuvent varier par la puissance et la taille des éoliennes utilisées mais aussi par le type de flotteur et de système d'amarrage utilisé.

Dans une ferme éolienne flottante on trouve également, en plus du système éolienne-flotteur-amarrage, des câbles d'interconnexion entre les éoliennes ainsi qu'un câble d'export qui vient connecter la ferme au réseau de transport d'électricité.

En fonction de la taille des projets, un transformateur flottant peut également être installé au large.

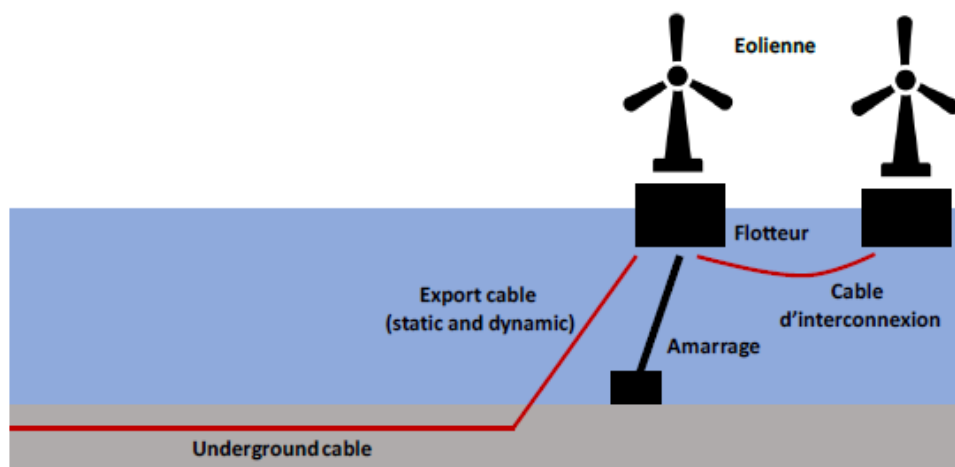


Schéma simplifié d'une installation éolienne flottante - Source : Projet INCER-ACV

6 projets étudiés

Il existe en Europe 2 projets pilotes d'éolien flottant opérationnels ainsi que 4 projets français en cours de développement.

Les projets en fonctionnement sont situés en Ecosse (Hywind Scotland) et au Portugal (WindFloat Atlantic).

Les projets français en cours de développement sont situés en Bretagne (Eoliennes flottantes de Groix et Belle-Ile) et en méditerranée pour 3 d'entre eux (Provence Grand Large ; Eoliennes flottantes du Golfe du Lion ; EOLMED).

Système étudié

L'analyse réalisée ici se base sur la catégorie d'impact réchauffement climatique des analyses de cycle de vie (ACV) des différents projets étudiés.

L'unité fonctionnelle choisie est la fourniture d'un kWh produit en courant alternatif livré au réseau de transport de l'électricité.

Le champs d'étude prend en compte :

- l'extraction et la fabrication des matières premières, la fabrication et le transport des éléments constitutifs des éoliennes, des flotteurs, des systèmes d'amarrage et des différents câbles (d'interconnexion et d'export)
- L'assemblage et l'installation sur site
- Le raccordement au réseau de transport d'électricité
- La maintenance du système
- Le désassemblage et la fin de vie

Projets concernés par l'étude

Nom du projet	<i>Provence Grand Large</i>	<i>Eoliennes flottantes du Golfe du Lion</i>	<i>EOLMED</i>	<i>Eoliennes flottantes de Groix et Belle-Ile (ancien projet)</i>	<i>Hywind Scotland</i>	<i>WindFloat Atlantic*</i>
Puissance	3 éoliennes Siemens-Gamesa en mer de 8,4 MW (25 MW de puissance cumulée) installées sur un système de flotteurs à lignes d'ancrage tendues.	3 éoliennes en mer de 10 MW sur des structures flottantes (30 MW de puissance cumulée)	3 éoliennes en mer de 10 MW (30 MW de puissance cumulée) Barge semi-submersible Béton léger + acier, ancres de type charrue (8 lignes d'ancrage / éolienne)	4 éoliennes en mer de 6 MW (25 MW de puissance cumulée) 4 flotteurs hybrides acier/béton par éolienne	5 éoliennes en mer de 6 MW <i>Hywind</i> floating turbines (30 MW de puissance cumulée) Flotteurs type SPAR	3 éoliennes flottantes de WindFloat Atlantic de 8,4 MW (25 MW de puissance cumulée) sur des plateformes flottantes solidement ancrées à 100 mètres de profondeur
Date de mise en service	Mise en service à horizon 2021	Mise en service en 2023	Construction : 2022-2023	mise en service initialement prévue en 2020	En service depuis fin 2017	Depuis juillet 2020, WindFloat Atlantic alimente le réseau électrique portugais
Situation géographique et distance des côtes	17 km au large de Port-Saint-Louis-du-Rhône	16 km au large du Barcarès et de Leucate.	Installé au large de Gruissan, à plus de 15 kilomètres des côtes méditerranéennes	25 km du continent	29 km des côtes	20 kilomètres au large des côtes de Viana do Castelo
Qualité des données fournies	***	**	***	*	***	

Qualité des données fournies :

- * données incomplètes ne permettant aucune vérification
- ** résultats d'ACV fournis, peu d'indications sur les hypothèses
- *** résultats d'ACV complets, avec indication d'hypothèses mais sans justifications
- **** données complètes et justification des hypothèses retenues

Tableau 1 : détail des projets pilote d'éolien offshore recensés dans le cadre de l'étude

L'étude s'est basée sur l'analyse des documents transmis par les constructeurs des fermes pilotes ainsi que la littérature disponible sur l'éolien flottant en Europe.

Les documents constitutifs de l'étude sont les suivants :

- Ensemble des analyses de cycle de vie et de présentation des projets piloté d'éolien flottant listés page précédente
- Poujol et Al, Multi-criteria life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' real data
- Pérez-López et al, 2020. INCER-ACV : Incertitudes dans les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des filières de production énergétique par ACV
- Besseau et al. 2019. Renew & Sust Energ Rev 108, 274-288:
- Carbon Trust, Floating Wind Joint Industry Project, phase 2, juillet 2020
- Cycleco 2015. « Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France », Rapport final. ADEME.
- Rapport du GIEC, 2011 Renewable Energy Sources and climate change mitigation.
- retour de l'autorité environnementale sur le projet de parc éolien de Saint Nazaire
- fiche récapitulant les Bilans carbone des projets d'éoliens offshore, intitulée "Quel est le bilan carbone d'un parc éolien flottant ?", établie par le maître d'ouvrage
- Ainsi que des documents interne RTE : Analyse du cycle de vie du poste en mer, rapport d'étude RTE ; Analyse du cycle de vie d'une ligne sous-marine

Analyse

Sur la base des données obtenues, ont été analysées les différences de périmètres considérées afin d'avoir des données comparables, puis une analyse des émissions de gaz à effet de serre (GES) a été réalisée par phase du projet et par élément.

Ces analyses permettent de faire ressortir différents facteurs de sensibilité qui sont décrits afin de déterminer de manière prospective l'intensité carbone d'une ferme d'éoliennes flottantes à l'échelle commerciale et de pouvoir la mettre en comparaison d'autres modes de production d'électricité bas carbone.

Enfin quelques perspectives sont dressées pour diminuer le bilan carbone de l'éolien flottant.

Comité de suivi

La réalisation de cette étude a été suivie par un comité composée de la maîtrise d'ouvrage du projet EOS (Ministère de la Transition Ecologique, RTE), de l'ADEME, de l'Association Bilan Carbone, de Mme Pérez-Lopez (OIE – Centre Observation, Impacts, Energie, Mines Paris-Tech), de M Ladsous (Association Toutes Nos Energies, Occitanie Environnement, TNE/OE) et de l'équipe de la CPDP du débat EOS.

La CPDP remercie ces personnes pour leur participation. Toutefois, les résultats et analyses livrés ici ne les engagent en rien.

Analyse sur la base de 5 projets pilotes européen d'éolien flottant utilisant différentes techniques.

Les 5 projets analysés ont réalisés un travail d'analyse de cycle de vie ayant la même unité fonctionnelle : la fourniture d'un kWh produit en courant alternatif livré au réseau de transport de l'électricité.

	Emissions de CO2 équivalent par kWh produit	Emissions de CO2e en valeur absolue	Quantité d'énergie produite sur 20 ans
Parc 1	47,3 gCO2e/kWh	101 000 tonnes CO2e	2 130 GWh
Parc 2	52 gCO2e/kWh	94 200 tonnes CO2e	1 810 GWh
Parc 3	26,9 gCO2e/kWh	71 200 tonnes CO2e	2 650 GWh
Parc 4	36,4 gCO2e/kWh	65 520 tonnes CO2e	1 800 GWh
Parc 5	24,1 gCO2e/kWh	33 740 tonnes CO2e	1 400 GWh
Moyenne : 37,4 gCO2e/kWh			

Tableau 2 : intensités carbone communiquées par 5 projets pilote d'éolien offshore.

La moyenne constatée dans les ACV réalisées pour ces 5 projets est de 37,4 gCO2e/kWh. Il s'agit là de l'intensité carbone supposée des projets. Celle-ci est le rapport entre les émissions de CO2 en valeur absolue, qui auront lieu dans les phases de construction, assemblage, entretien et démantèlement des éoliennes et la quantité d'énergie produite estimée sur 20 ans.

La quantité d'énergie produite dépend de l'utilisation réelle de l'éolienne. En fonction des projets et de leur emplacement, un facteur de charge de 35% à 50% a été pris en compte. Une sous utilisation ou une sur utilisation par rapport au facteur de charge estimé peut augmenter ou réduire l'intensité carbone de la ferme pilote.

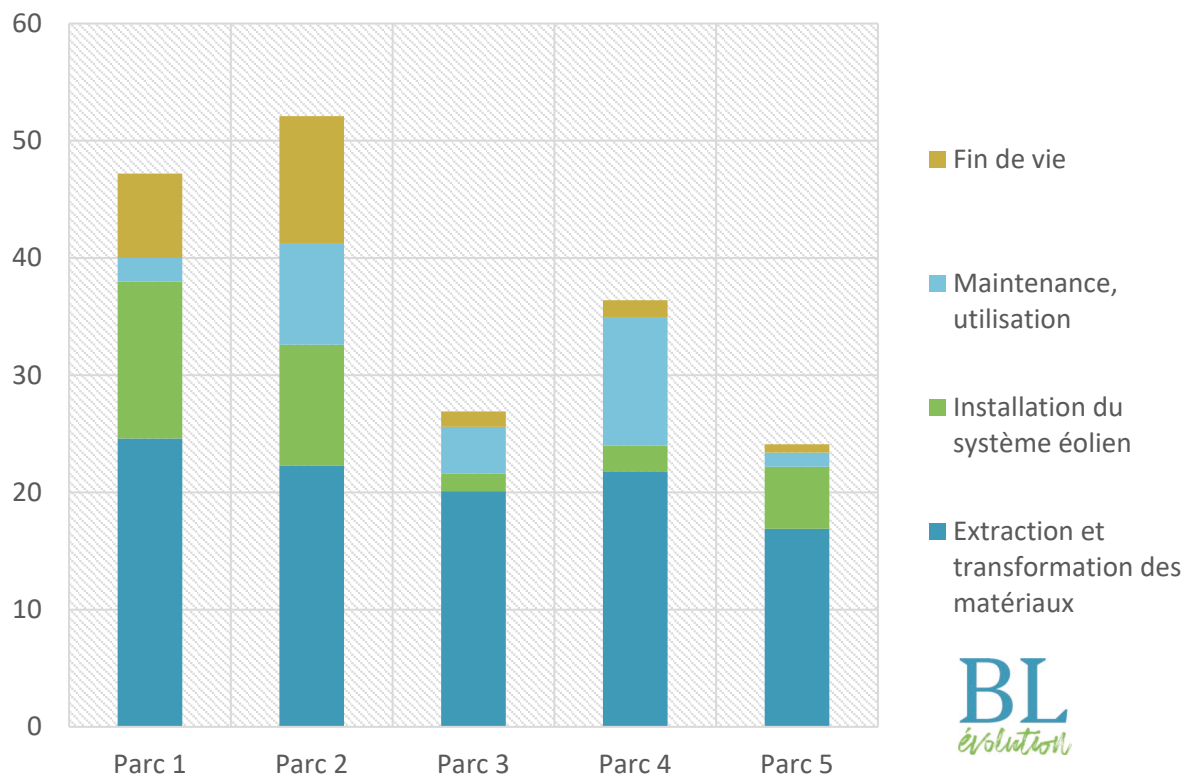
Il est intéressant de noter à ce stade qu'il n'y a pas de corrélation entre l'intensité carbone et la quantité d'énergie produite pour les fermes pilotes. Les 2 projets ayant l'intensité carbone la plus faible étant les projets produisant le moins et le plus d'énergie.

Il n'y a pas non plus de corrélation entre l'intensité carbone et la puissance des éoliennes.

L'intensité carbone moyenne communiquée par les projets pilote d'éolien flottant est de 37,4 gCO2e/kWh.

Répartition des émissions de GES par phase du projet en gCO₂e/kWh

Emissions de gaz à effet de serre en gCO₂e/kWh de 5 fermes pilotes d'éolien flottant



Graphique 1 : répartition de l'intensité carbone des fermes pilotes d'éolien flottant en fonction de la phase du projet. Calculs : BL évolution issus des ACV des fermes.

Les différences d'intensité carbone proviennent principalement de la consommation des navires en phase d'installation, de maintenance et de fin de vie.

L'intensité carbone de 5 fermes pilotes en gCO₂e/kWh en fonction de la phase du projet (graphique 1) permet de distinguer les émissions de GES liées aux différentes phases du projet : Extraction et transformation des matériaux, installation du système éolien, utilisation et maintenance et fin de vie.

Sur l'ensemble des 5 projets, la phase d'extraction et de transformation des matériaux présente une contribution à l'intensité carbone du parc assez similaire (entre 17 et 24,3 gCO₂e/kWh), avec une différence qui se justifie essentiellement par la technique utilisée.

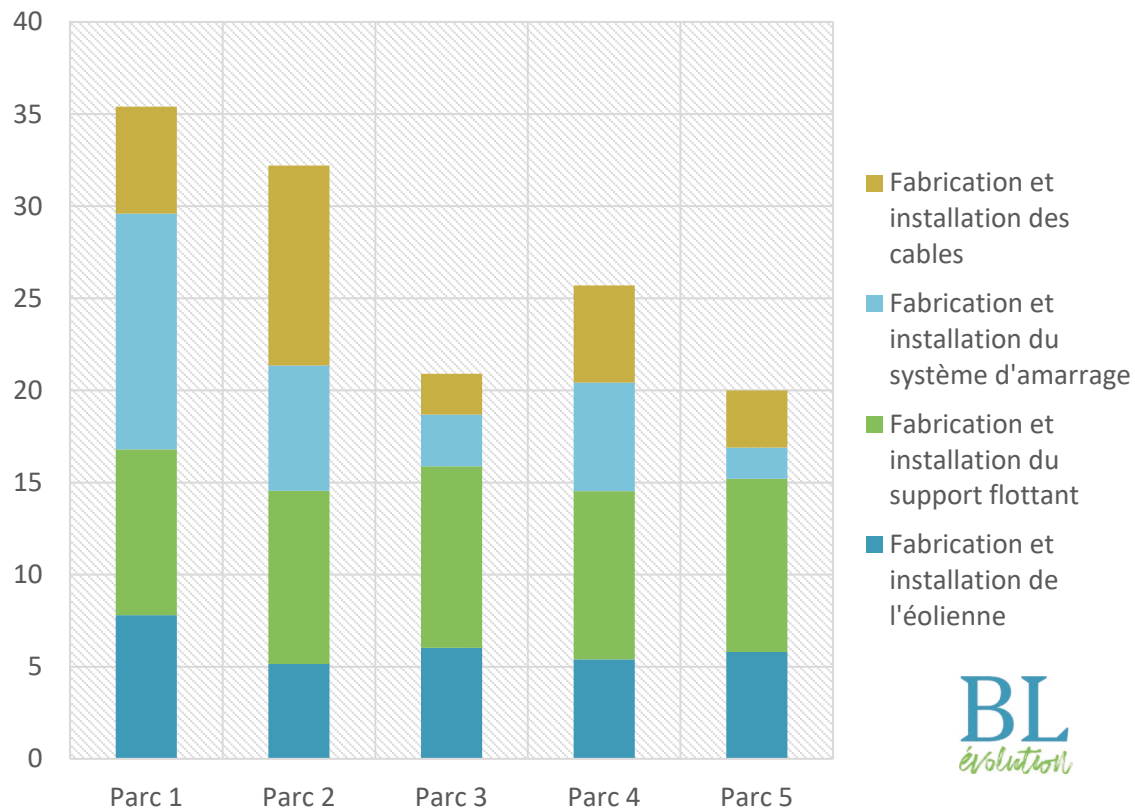
A noter tout de même qu'en fonction des projets, la partie « transport des matériaux » est parfois incluse dans le poste extraction et transformation (parcs 2 et 4) et parfois dans installation (parcs 1, 3 et 5), ce qui rend difficilement comparable cette donnée entre les ACV.

Néanmoins, nous pouvons estimer à environ 10% l'impact de l'acheminement des matériaux soit entre 2 et 3 g CO₂e/kWh.

La plus grande variabilité provient des hypothèses liées aux consommations des navires en phase d'installation, de maintenance et de fin de vie. Sur ces 3 phases, l'essentiel de l'impact carbone provient de l'utilisation de navires. Par exemple, l'ACV du parc 1 considère l'utilisation de 11 000 tonnes de carburant (type MGO – Marine GasOil) pour l'ensemble de ces 3 phases. L'ACV du parc 2 considère l'utilisation de 15 000 tonnes de carburant (type MGO).

Répartition des émissions de GES par élément en gCO₂e/kWh

Emissions de gaz à effet de serre en gCO₂e/kWh de 5 parcs pilotes d'éolien flottant



Graphique 2 : répartition de l'intensité carbone de la fabrication et l'installation des fermes pilotes d'éolien flottant en fonction des éléments constitutifs. Calculs : BL évolution issus des ACV des fermes.

Pour la partie fabrication et installation, le système d'amarrage est un facteur de variabilité plus important que l'éolienne et son support.

Le graphique 2 reprend uniquement les données issues de la fabrication et l'installation des fermes éoliennes. Sont ainsi exclues l'utilisation et la fin de vie des éoliennes.

Nous constatons que la fabrication et l'installation du système éolienne + support varie peu en fonction des projets et s'explique par la technique constructive utilisée qui varie d'un projet à l'autre ainsi que par le lieu de fabrication.

Le système d'amarrage et l'installation des câbles d'interconnexion et d'export sont les principaux éléments de différenciation.

Pour les projets 3, 4 et 5, il est probable que l'installation du câble d'export (raccordement au réseau) n'ait pas été prise en compte, ainsi la partie « câbles » ne prendra en compte que les câbles d'interconnexion entre les éoliennes.

Il est cohérent, pour des projets pilotes, que la part relative au câble d'export soit importante étant donné la sous optimisation de ce poste (20 km de câble en moyenne pour 3 à 5 éoliennes raccordées).

Détail de la répartition des émissions de GES

Phase	Parc 1	Parc 2	Parc 3	Parc 4	Parc 5
Extraction et transformation des matériaux	24,6	22,3	20,1	21,8	16,9
Installation du système éolien	13,4	10,3	1,5	2,2	5,3
Maintenance, utilisation	2,0	8,6	4,0	10,9	1,2
Fin de vie	7,2	10,9	1,3	1,5	0,7
Total	47,3	52	26,9	36,4	24,1

Tableau 3 : répartition de l'intensité carbone des fermes pilotes d'éolien flottant en fonction de la phase du projet. Calculs : BL évolution issus des ACV des fermes.

Une vigilance doit être prise dans l'analyse et la comparaison de ces données, certaines ACV fournies étant très peu détaillées (en particulier pour les parcs 4 et 5)

Phase	Parc 1	Parc 2	Parc 3	Parc 4	Parc 5
Fabrication et installation de l'éolienne	7,8	5,2	6,0	5,4	5,8
Fabrication et installation du support flottant	9	9,4	9,8		9,4
Fabrication et installation du système d'amarrage	12,8	6,8	2,8	20,3	1,7
Fabrication et installation des câbles	5,8	10,9	2,2		3,1
Total	35,4	32,2	20,9	25,7	20

Tableau 4: répartition de l'intensité carbone de la fabrication et l'installation des fermes pilotes d'éolien flottant en fonction des éléments constitutifs. Calculs : BL évolution issus des ACV des fermes.

Faute de données pour le parc 4, la répartition des émissions de GES entre le support flottant, le système d'amarrage et les câbles a été prise en faisant la moyenne du ratio pour les autres parcs.

Principaux facteurs de sensibilité des projets pilote d'éolien flottant

Le projet INCER-ACV identifie 3 paramètres prépondérants faisant varier l'intensité carbone d'un projet éolien offshore. Il s'agit du facteur de charge (qui entraîne une variation de 64% des impacts), du taux d'acier recyclé (53%) et de la durée de vie des éoliennes (22%).

Durée de vie et facteur de charge de l'éolienne : pour les 5 parcs étudiés, l'analyse a été faite sur la base d'une durée de vie de 20 ans pour tous les projets et un facteur de charge qui varie en fonction des projets entre 35% et 50%.

Taux d'acier recyclé : cette information n'est pas communiquée dans les 5 parcs étudiés.

L'analyse des 5 parcs étudiés a mis en exergue 3 autres facteurs de sensibilité :

- **La technique constructive utilisée** qui varie d'un projet à l'autre. Malgré différentes techniques utilisées dans les projets étudiés, la sensibilité semble surtout liée au système d'amarrage.
- **La longueur du câble d'export.** La fabrication, la pose, l'entretien et le démantèlement de ce câble représente un poste très significatif des fermes pilotes.
- **Le type de navire utilisé** en phase d'installation, maintenance et démantèlement. Des navires fonctionnant avec une énergie moins carbonée auraient un impact plus réduit. Le nombre d'heure d'utilisation des navires pris en considération dans les ACV varie fortement d'un projet à l'autre.

Données non prises en compte :

- **Raccordement au réseau :** Pour certains parcs le câblage d'export (entre les éoliennes et le poste de transformation sur terre) n'est pas pris en compte. Pour d'autres, le câble est pris en compte mais il manque le raccordement de ce câble au poste sur terre.
- **Maintenance d'urgence et curative :** Seule la maintenance préventive est prise en compte. Les opérations de maintenance d'urgence ou suite à une panne ne sont pas considérées dans les ACV des projets pilotes.
- **Système industrielle permettant la fabrication des éoliennes :** La nécessité éventuelle de créer une nouvelle infrastructure industrielle pour la fabrication ou l'assemblage des différents éléments constitutifs du système d'éolien flottant n'est pas considérée et aucune émission de GES induite par ce système industrielle n'est prise en compte.
- **Autres émissions liées à la vie de chantier et aux fonctions supports :** le marketing lié au produit, les installations de restauration du personnel support et la vie de chantier lors de l'installation ne sont pas prises en compte.

Impacts potentiels non pris en compte :

- **Trajets des navires :** L'installation des éoliennes peut entraîner des détours pour les navires. cela est plus la résultante d'un choix d'implantation qu'une caractéristique propre à un projet d'éolien flottant.
- **Équilibrage du réseau et énergies pilotables instantanées :** cette donnée est difficile à rattacher à un projet en particulier et dépend de l'ensemble des installations présentes sur le réseau. Le choix est fait dans cette étude de ne pas considérer ces éléments.

Le facteur de charge est un élément clé dans l'optimisation possible de l'intensité carbone de l'éolien et apparaît dans l'étude INCER-ACV 2021 comme le facteur qui entraîne la plus grande variation de l'impact.

Pour autant, s'il est possible d'optimiser le facteur de charge, notamment en réduisant la période d'indisponibilité des éoliennes, celui-ci est en grande partie déterminé par le lieu d'implantation, choisi notamment en fonction des cartes de vents, et par les conditions météorologiques sur l'ensemble de la durée de vie de la ferme éolienne.

Un autre facteur important est la durée de vie de l'installation. Si celui-ci dépend également des conditions météorologiques et des avaries subies, le système éolien peut-être conçu en amont pour une durée de vie plus longue. Les prototypes d'éoliennes flottantes ont souvent largement dépassé la durée de vie prévue et si les projets pilotes d'éolien flottant sont conçus pour 20 ans, il est possible que leur durée de vie réelle atteigne 25 ans.

Le tableau 5 reprend les valeurs d'émissions de CO₂, de production énergétique et donc l'intensité carbone des projets de fermes pilotes d'éolien flottant dans un scénario optimisée.

Dans ce scénario, nous considérons une durée de vie de 25 ans et un gain de 10% du facteur de charge (soit un facteur qui passe de 50% à 55% par exemple).

Pour les émissions de CO₂e, nous faisons l'hypothèse suivante : les émissions liées aux phases de fabrication, d'installation et de démantèlement restent identiques. En revanche, il y a une augmentation proportionnelle aux heures de production des émissions de GES de la phase de maintenance.

Emissions de CO ₂ équivalent par KWh produit base 25 ans	Emissions de CO ₂ e en valeur absolue pour 25 ans d'utilisation	Quantité d'énergie produite sur 25 ans + Gain de 10% du facteur de charge
35,2 gCO ₂ e/kWh	103 000 tonnes CO ₂ e	2 930 GWh
40,2 gCO ₂ e/kWh	100 000 tonnes CO ₂ e	2 490 GWh
20,7 gCO ₂ e/kWh	75 200 tonnes CO ₂ e	3 640 GWh
29,2 gCO ₂ e/kWh	72 150 tonnes CO ₂ e	2 475 GWh
17,9 gCO ₂ e/kWh	34 500 tonnes CO ₂ e	1 925 GWh
Moyenne : 28,6 gCO₂e/kWh		

Tableau 5: intensité carbone, émissions de GES et quantité d'énergie produite dans le cas d'un scénario d'utilisation optimisée. Calculs : BL évolution issus des ACV des fermes.

Dans ce scénario optimisée, la moyenne de l'intensité carbone des fermes passe de 37,4 à 28,6 gCO₂e/kWh, soit une diminution de 23%.

Cet exercice démontre la variabilité de l'intensité carbone finale de la ferme éolienne en fonction de la quantité d'énergie réellement produite. De la même manière, une ferme peu productive, avec une durée de vie réduite et un faible taux de charge pourrait voir son intensité carbone augmenter.

Dans l'hypothèse d'un fonctionnement optimisé, l'intensité carbone de projets pilote d'éolien flottant pourrait être réduit de 23% et être de l'ordre de 30 gCO₂/kWh

Proposition d'une valeur moyenne pour les fermes pilotes d'éolien flottant

L'analyse des ACV des 5 fermes pilotes d'éolien flottant permet de voir une disparité importante entre les phases du projet. Dans le tableau 6 sont détaillées les valeurs basses et hautes constatées pour chaque phase du projet ainsi que la valeur moyenne estimée pour un périmètre identique. Ces variabilités sont détaillées en page suivante.

Aux valeurs fournies dans les ACV est également ajouté une estimation de l'intensité carbone liée à la maintenance curative ainsi qu'au raccordement du réseau et aux pertes en lignes. Pour la maintenance curative, l'hypothèse prise est celle d'un rapatriement à quai de chaque éolienne une fois dans sa durée de vie. Pour le raccordement au réseau et les pertes en ligne les données proviennent de RTE sur la base de projets similaires.

Ainsi, l'intensité carbone des fermes pilotes d'éolien flottant peut être considérée entre 23 et 71 gCO₂e/kWh avec une valeur moyenne de 42 gCO₂e/kWh. En retranchant la maintenance curative*, cela donne une valeur de 39 gCO₂e/kWh pour une durée de vie de 20 ans. Dans un scénario optimisé, avec une durée de vie de 25 ans et un gain sur le facteur de charge, l'intensité carbone peut être réduite de 23% pour atteindre 30 gCO₂e/kWh hors maintenance curative.

Etant donné que la contractualisation de ces projets est faite pour une durée de 20 ans et qu'il n'y a aucune garantie d'un fonctionnement optimisé ou au contraire sous optimisé, nous proposons de retenir pour les fermes pilotes d'éolien flottant une **valeur moyenne d'intensité carbone de 39 gCO₂e/kWh** hors maintenance curative.

* non prise en compte dans les ACV des fermes pilotes, voir p.10

L'intensité carbone moyenne retenue pour un projet pilote d'éolien flottant est de 39 gCO₂/kWh

Phase	Valeur basse	Valeur haute	Valeur moyenne
Fabrication et installation de l'éolienne	5	8	6
Fabrication et installation du support flottant	9	10	9,5
Fabrication et installation du système d'ancrage	2	13	7
Fabrication et installation des câbles	3	11	7
Phase d'utilisation et maintenance préventive	2	11	4
Maintenance curative	0	6	3
Raccordement réseau et pertes en ligne	1	1	1
Fin de vie	1	11	4,5
TOTAL	23	71	42

Tableau 5: estimation de l'intensité carbone de l'éolien flottant par phase en g CO₂e/ kWh. Hypothèses et calculs : BL évolution.

Fabrication et installation de l'éolienne : pour les 5 parcs étudiés, l'intensité carbone de la fabrication et l'installation de l'éolienne est comprise entre 5 et 8 gCO₂e/kWh. A l'exception d'un parc, les valeurs sont toutes comprises entre 5 et 6,5 gCO₂e/kWh. Nous retenons une valeur moyenne de 6 gCO₂e/kWh.

Fabrication et installation du support flottant : malgré différentes technologies utilisées, l'intensité carbone est systématiquement comprise entre 9 et 10 gCO₂e/kWh. Nous retenons une valeur moyenne de 9,5 gCO₂e/kWh.

Fabrication et installation du système d'ancrage : en fonction du parc, cette donnée varie énormément, avec des valeurs comprises entre 2 et 13 gCO₂e/kWh. Cela s'explique notamment par des systèmes d'ancrage très différents et un nombre de câbles par éolienne qui varie entre 3 et 8 selon les parcs. La distance au fond marin et la longueur des câbles jouent également un rôle clé dans l'intensité carbone. Nous considérons une valeur moyenne de 7 gCO₂e/kWh, ce qui correspond à la valeur du projet médian.

Fabrication et installation des câbles : ce poste varie également très fortement entre les parcs étudiés, avec des valeurs comprises entre 3 et 11 gCO₂e/kWh. La distance au rivage est un paramètre fortement influent pour ce poste ainsi que la technique d'enfouissement utilisée. Par manque d'information, nous n'avons pu établir si l'ensemble des parcs prennent en considération le câble d'export ou uniquement les câbles inter éoliennes. Pour les projets dont les données sont claires, le carburant utilisé par les navires d'installation du câble d'export est le premier contributeur à l'intensité carbone de ce poste. Compte-tenu des données obtenues, nous retenons une valeur moyenne de 7 gCO₂e/kWh.

Phase d'utilisation et maintenance préventive : cette donnée diffère fortement d'un parc à l'autre, avec des valeurs comprises entre 2 et 11 gCO₂e/kWh. L'intensité carbone de cette phase est essentiellement liée au carburant des navires utilisés en phase de maintenance. Ainsi, l'élément déterminant est le nombre de jours de maintenance annuel. En considérant une moyenne de 4 jours de maintenance par éolienne et 4 à 8 jours pour le câble d'export, l'intensité carbone moyenne de cette étape serait de 4 gCO₂e/kWh.

Maintenance curative : pour modéliser cette phase de maintenance curative, qui n'est prise en compte dans aucune des ACV analysées, nous considérons le rapatriement de l'éolienne et de son support à terre puis sa remise en position. Compte-tenu des données fournies pour l'installation et le démantèlement des éoliennes, cela représente une intensité carbone de l'ordre de 3 gCO₂e/kWh par maintenance curative. Nous prenons en valeur basse aucune maintenance curative et en valeur haute 2 maintenances curatives par éolienne, soit une intensité carbone comprise entre 0 et 6 gCO₂e/kWh avec une valeur moyenne de 3 gCO₂e/kWh.

Raccordement réseau et pertes en ligne : les projets pilotes sont directement raccordés à des postes existants sur terre, sans besoin d'un poste en mer. Les données de pertes en ligne de la ligne sous marine sont fonction de l'énergie traversant ces lignes et de la longueur des lignes. Avec une longueur de ligne comprise entre 15 et 30 km pour les projets pilotes étudiés, l'intensité carbone liée à ce poste est comprise entre 0,6 et 1,2 gCO₂e/kWh. Nous retenons une intensité moyenne de 1 gCO₂e/kWh.

Proposition d'une valeur moyenne pour les fermes pilotes d'éolien flottant

Fin de vie : comme pour la maintenance préventive, les données de fin de vie varient fortement et sont liées au carburant des navires utilisés pour le démantèlement de l'installation. Les valeurs sont comprises entre 1 et 11 gCO₂e/kWh. La part liée au démantèlement du câble d'export représente entre 60 et 80% de cette valeur, si bien que, hors démantèlement du câble d'export, cette valeur est comprise entre 1 et 3 g CO₂e/kWh. Sur au moins un projet, il est choisi de laisser le câble d'export sur place. Nous prenons une valeur moyenne pour le démantèlement du câble d'export de 3 gCO₂e/kWh, soit au total une intensité carbone de 4,5 gCO₂e/kWh pour la fin de vie.

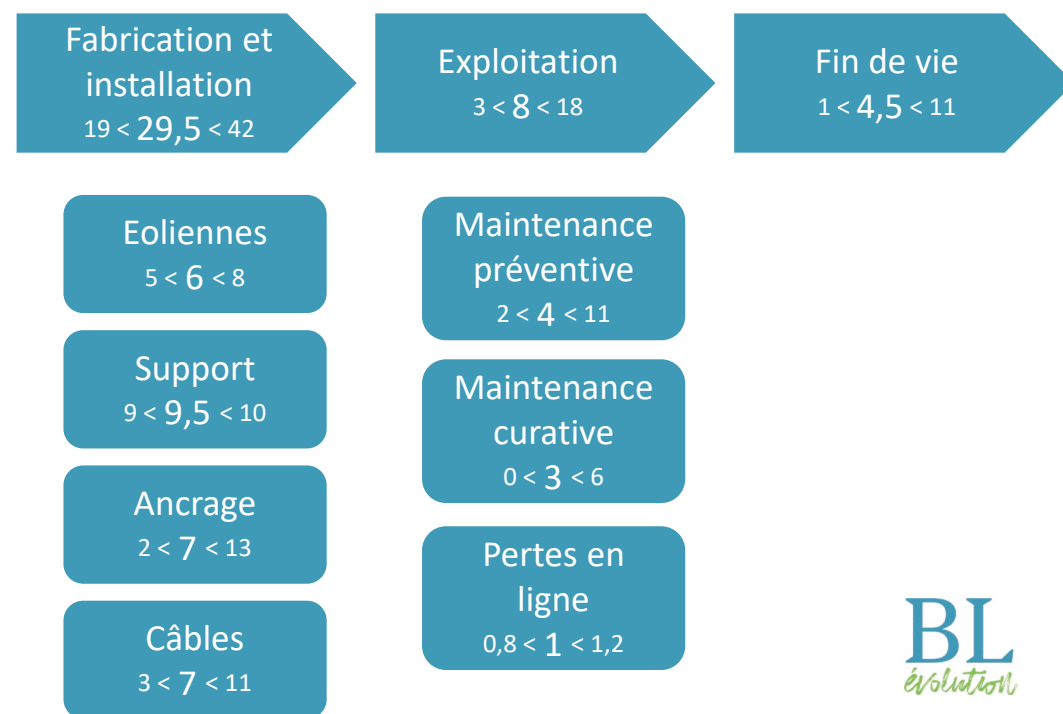


Figure 1 : Contribution à l'intensité carbone des projets pilotes d'éolien flottant par élément, en gCO₂e/kWh. La phase de fabrication et d'installation contribue à 29,5 gCO₂e/kWh (entre 19 et 42 gCO₂e/kWh)

Passage à une utilisation commerciale

Le passage à une utilisation commerciale doit permettre de réduire l'intensité carbone de l'éolien flottant, en particulier grâce aux éléments suivants :

- Innovation technologique sur le système éolien, flotteur, ancrage. Gain considéré de l'ordre de 30%
- Répartition de l'impact carbone lié au câble de raccordement sur 10 fois plus d'éoliennes
- Optimisation d'une partie des trajets d'installation, maintenance et démantèlement
- Diminution des opérations de maintenance préventive

En revanche, un projet commercial nécessite l'installation d'un poste source en mer, ce qui augmente le poste raccordement réseau.

En ce qui concerne l'optimisation de l'appareil industriel de fabrication des éoliennes, celui-ci n'étant pas pris en compte dans l'ACV, il n'en résulte aucun impact.

Avec l'hypothèse d'une durée de vie de 25 ans conforme aux autres types de production d'électricité éolien (posé en mer et terrestre), nous proposons de retenir une **valeur moyenne d'intensité carbone de 19,5 gCO₂e/kWh** pour les fermes commerciales d'éolien flottant de première génération hors maintenance curative*.

* non prise en compte dans les ACV des fermes pilotes, voir p.10

Phase	Valeur moyenne fermes pilotes sur 20 ans	Valeur moyenne fermes commerciales 20 ans	Valeur moyenne fermes commerciales 25 ans
Fabrication et installation de l'éolienne	6,5	6	4,5
Fabrication et installation du support flottant	9,5	7	5,5
Fabrication et installation du système d'ancrage	7	5	3,5
Fabrication et installation des câbles	7	1,5	1
Maintenance, utilisation préventive	4	2	2
Maintenance curative	3	3	3
Raccordement réseau et pertes en ligne	1	2	1,5
Fin de vie	4	3	2
TOTAL	42 gCO₂e/kWh	29,5 gCO₂e/kWh	22,5 gCO₂e/kWh

Tableau 6: estimation de l'intensité carbone de l'éolien flottant par phase lors d'une utilisation commerciale en gCO₂e/ kWh. Hypothèses et calculs : BL évolution.

Fabrication et installation de l'éolienne : la technologie étant déjà mature sur ce poste, un gain de 10% est considéré correspondant à l'utilisation d'éoliennes de plus forte puissance.

Fabrication et installation du support flottant : la technologie étant encore amenée à évoluer sur ce poste, un gain de 30% est considéré.

Fabrication et installation du système d'ancrage : une optimisation du nombre de câbles de raccordement est considéré avec un gain possible de 30%.

Fabrication et installation des câbles : les émissions de gaz à effet de serre liées à l'installation du câble d'export sont réparties sur 10 fois plus d'éoliennes, ce qui divise par 10 son impact. Peu d'évolution pour les câbles d'interconnexion. Le gain global est de 80% pour ce poste.

Phase d'utilisation et maintenance préventive : les projets pilotes représentant des phases de tests, les opérations de maintenance sont maximisées. Pour les projets commerciaux, la maintenance du câble d'export est répartie sur plus d'éoliennes. Ces deux éléments permettent d'envisager un gain de 50% sur ce poste.

Maintenance curative : nous conservons pour ce poste l'hypothèse d'une opération lourde en moyenne par éolienne sur sa durée de vie.

Raccordement réseau et pertes en ligne : l'installation d'un poste source en mer entraîne l'augmentation de l'intensité carbone de 1 gCO₂e/kWh. Les pertes en ligne évoluent en fonction de la longueur du câble d'export. A noter que cette relation n'est pas complètement linéaire. Ainsi, d'une intensité carbone de 1 gCO₂e/kWh pour un projet situé à 25 km des côtes on passe à 2,8 gCO₂e/kWh pour un projet situé à 60 km des côtes.

Fin de vie : un gain de 20% est considéré correspondant à une optimisation des opérations de démantèlement.

L'intensité carbone moyenne retenue pour un projet commercial d'éolien flottant est de 19,5 gCO₂/kWh

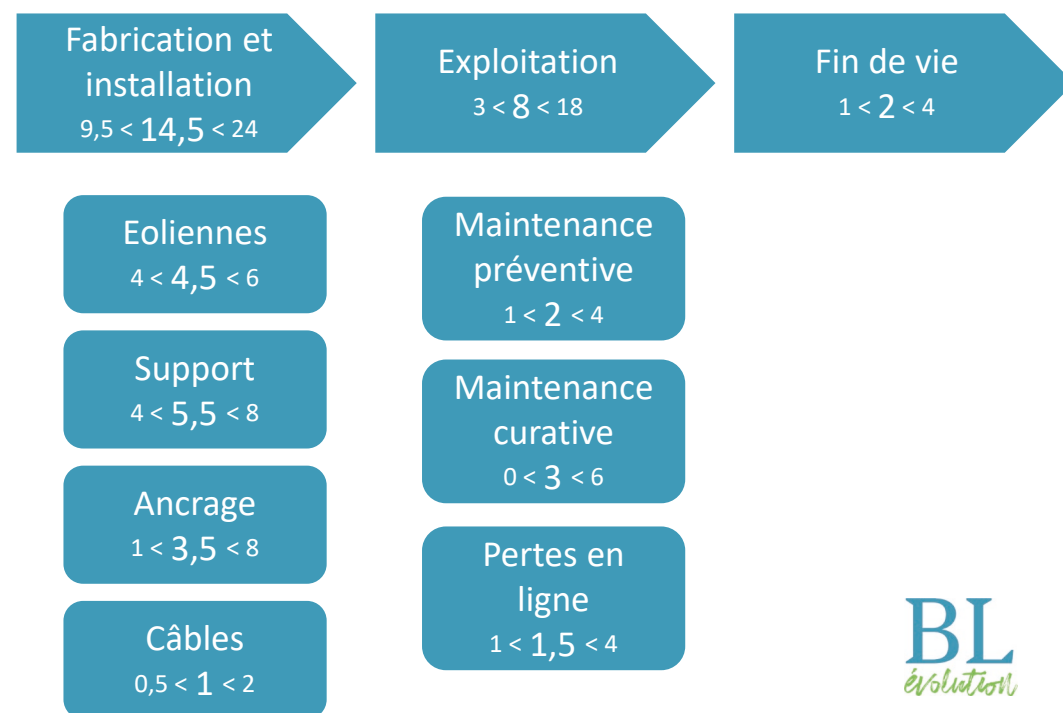


Figure 2 : Contribution à l'intensité carbone des projets commerciaux d'éolien flottant par élément, en gCO₂e/kWh. La phase de fabrication et d'installation contribue à 14,5 gCO₂e/kWh (entre 9,5 et 24 gCO₂e/kWh)

Comparaison à d'autres technologies de production électrique

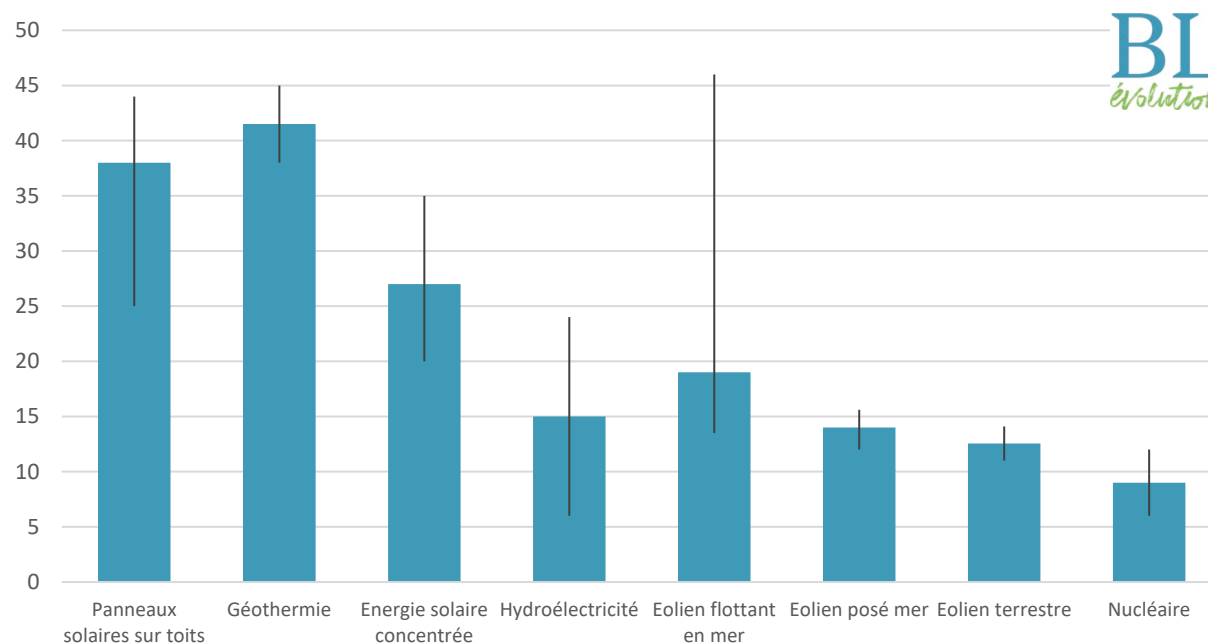
Afin de pouvoir positionner l'éolien flottant vis-à-vis d'autres technologies de production électrique, la valeur comparative à prendre en compte pour l'intensité carbone de l'éolien flottant est de 19,5 gCO₂e/kWh (donnée sur 25 ans des projets commerciaux hors maintenance curative).

Le tableau suivant reprend les données d'intensité carbone de différentes technologies selon deux sources : l'ADEME pour des données françaises et le rapport 5 du GIEC pour des données mondiales.

Technologie	ADEME	GIEC – AR5
Charbon	1060	820
Gaz – cycle combiné	418	490
Biomasse		230
Panneaux solaires à grande échelle	25 – 44	48
Panneaux solaires sur toits	25 – 44	41
Géothermie	45	38
Energie solaire concentrée		27
Hydroélectricité	6	24
Eolien en mer	15,6	12
Nucléaire	6	12
Eolien terrestre	14,1	11

Tableau 7 : intensité carbone de différentes technologies de production d'électricité, en gCO₂e/kWh

Intensité carbone de différents type d'énergie en gCO₂e/kWh



Graphique 3 : intensité carbone et incertitudes de différents type d'énergie en gCO₂e/kWh.
Base ADEME + GIEC – AR5

Il ressort de l'analyse bibliographique des bilans carbone de l'éolien flottant une difficulté d'accès aux données et de comparaisons des projets entre eux.

Si l'éolien flottant apparaît comme une solution de production électrique bas carbone, il reste nécessaire de s'intéresser dès l'amont et durant toute la vie des fermes éoliennes à l'optimisation des émissions de GES induites au travers des différentes phases du projet, ces émissions pouvant varier du simple au double en fonction des projets.

L'analyse réalisée propose de retenir pour les fermes pilotes d'éolien flottant une **valeur moyenne d'intensité carbone de 39 gCO₂e/kWh** hors maintenance curative.

Avec l'hypothèse d'une durée de vie de 25 ans conforme aux autres types de production d'électricité éolien (posé en mer et terrestre), la **valeur moyenne d'intensité carbone retenue est de 19,5 gCO₂e/kWh** pour les fermes commerciales d'éolien flottant de première génération hors maintenance curative.

Ainsi, l'éolien flottant trouve sa place dans l'univers des technologies de production d'électricité bas carbone en proposant une intensité carbone 10 à 20% supérieure à celle de l'éolien posé en mer et inférieur à la valeur actuelle d'autres technologies comme le solaire photovoltaïque.

La valeur retenue reste néanmoins supérieure à la valeur moyenne de l'intensité carbone du mix électrique français à horizon 2050, mais des marges de manœuvres existent pour réduire cette intensité carbone.

Préconisations pour optimiser l'intensité carbone de l'éolien flottant

- Faire des ACV robustes et communiquer dessus en indiquant la valeur CO₂e par phase du projet
- Utiliser autant que possible des matières recyclées dans la conception du dispositif et limiter les émissions de GES liées au transport des matériaux
- Utiliser des navires à bas carbone pour les phases d'installation, maintenance et fin de vie des fermes éoliennes
- Concevoir des systèmes robustes pour allonger la durée de vie du parc en visant une durée de vie de 30 ans pour le système éolien et de 90 ans pour le câblage et le raccordement au réseau.

L'intensité carbone de l'éolien flottant étant largement dépendante des phases amont, construction et installation du système il est nécessaire de prévoir ces mesures dès la première génération de fermes commerciales, celles-ci ayant vocation à être encore présentes en 2050.

L'éolien flottant pourrait ainsi viser une intensité carbone comprise entre 10 et 15 gCO₂e/kWh et tout projet commercial devrait être dimensionné pour garantir une intensité carbone inférieure à 20 gCO₂e/kWh.

SÉANCE DU 06 OCTOBRE 2021

DECISION N° 2021 / 137/ EOLIEN MEDITERRANEE / 6
PROJETS DE PARCS EOLIENS FLOTTANTS EN MER MEDITERRANEE

La Commission nationale du débat public,

- vu le Code de l'environnement en ses articles L. 121-1 et suivants, notamment l'article L. 121-8-1 et l'article L. 121-9,
- vu le courrier de saisine et le dossier annexé en date du 16 juillet 2020, de Madame Barbara POMPILI, ministre de la Transition écologique,
- vu sa décision n°2020/92/EOLIEN MEDITERRANEE/1 du 29 juillet 2020, décidant de l'organisation d'un débat public pour les projets de parcs éoliens flottants en mer Méditerranée,
- vu sa décision n°2020/107/EOLIEN MEDITERRANEE/2 du 2 septembre 2020, désignant Madame Sylvie DENIS-DINTILHAC comme Présidente de la commission particulière en charge de l'animation du débat public sur les projets de parcs éoliens flottants en mer Méditerranée,
- vu ses décisions n°2020/126/EOLIEN MEDITERRANEE/3 du 4 novembre 2020 et n° 2020/142/EOLIEN MEDITERRANEE/4 du 2 décembre 2020, désignant des membres de la commission particulière du débat public sur les projets de parcs éoliens flottants en mer Méditerranée,
- vu sa décision n°2021 / 54 / EOLIEN MEDITERRANEE / 5 du 5 mai 2021, désignant Monsieur Etienne BALLAN comme président de la commission particulière en charge de l'animation du débat public, validant le dossier du maître d'ouvrage, arrêtant les modalités et le calendrier du débat public,

après en avoir délibéré,

décide :

Article 1 : Sur proposition du Président de la commission particulière en charge de l'animation du débat public, une expertise complémentaire portant sur le bilan carbone de l'éolien flottant est engagée.

Article 2 : La présente décision sera publiée au Journal officiel de la République française.

La Présidente



Chantal JOUANNO