



Parc éolien  
en mer de Fécamp

**Bilan Carbone®**

**du parc éolien en mer au large de**

**Fécamp**



Octobre 2014

**DONG**  
energy



**edf**  
énergies nouvelles

## Sommaire

1.	Contexte .....	3
1.1.	Introduction.....	3
1.2.	Description succincte de la méthode du Bilan Carbone® .....	3
1.2.1.	Définition du champ d'étude .....	4
1.2.2.	Collecte des données.....	4
1.2.3.	Exploitation des résultats .....	5
1.2.4.	Intérêts et limites du Bilan Carbone® .....	6
2.	Présentation du projet .....	7
3.	Définition de l'aire d'étude et des moyens utilisés .....	9
3.1.	Définition de l'aire d'étude .....	9
3.2.	Les moyens utilisés.....	11
4.	Calcul des émissions CO <sub>2</sub> .....	12
4.1.	Développement du projet .....	12
4.2.	Fabrication des composants.....	12
4.2.1.	Production des matières premières .....	12
4.2.2.	Production des composants .....	18
4.3.	Construction du parc .....	18
4.3.1.	Transport des composants jusqu'au port.....	18
4.3.2.	Energie pour le levage et la construction du parc.....	19
4.4.	Exploitation et maintenance du parc .....	20
4.4.1.	Production d'électricité .....	20
4.4.2.	Opérations de maintenance.....	20
4.5.	Démantèlement du parc .....	21
4.5.1.	Energie nécessaire pour la déconstruction des équipements du parc .....	21
4.5.2.	Transport des différents éléments du port vers les centres de valorisation des matériaux .....	21
4.5.3.	Valorisation des matériaux.....	22
5.	Bilan.....	24

## 1. Contexte

### 1.1. Introduction

Toute activité humaine engendre directement ou indirectement des émissions de gaz à effet de serre (GES). Aussi, toute entreprise industrielle ou tertiaire, toute administration ou association doit légitimement se préoccuper de ses émissions et de la dépendance économique qui en résulte.

Le Bilan Carbone® est une méthode de comptabilisation en ordre de grandeur des émissions de gaz à effet de serre pour parvenir à une bonne évaluation des émissions directes ou induites par l'activité. C'est à la fois un outil et une démarche. La méthode utilisée permet de comptabiliser toutes les émissions, non seulement celles générées directement sur le site mais aussi toutes celles qui concourent tant en amont qu'en aval à la réalisation de l'activité principale.

Au-delà de la comptabilisation, le Bilan Carbone® se situe dans une démarche de management environnemental.

La réalisation d'un Bilan Carbone® s'inscrit dans la dynamique du Grenelle 2 et du « facteur 4 » dont l'objectif pour la France est de diviser par quatre ou plus, d'ici 2050, les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport aux émissions réalisées en 1990.

EDF EN France, Dong Energy et wpd Offshore prévoient via leur société du parc éolien en mer de Fécamp d'installer un parc éolien en mer au large des côtes de Fécamp.

Dans le cadre de ce projet, l'objectif est d'évaluer l'impact global en matière d'émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer à travers toutes les phases de son activité : études préalables, construction, exploitation, maintenance et démantèlement c'est-à-dire depuis les étapes de projet et d'élaboration, jusqu'à la remise du milieu dans son état initial, à l'issue de son exploitation.

Cette analyse permet notamment de préciser les émissions de gaz à effet de serre et de les exprimer en tonne équivalent CO<sub>2</sub> (t eq. CO<sub>2</sub>) ainsi qu'en gramme équivalent CO<sub>2</sub> par kWh produit (g eq. CO<sub>2</sub> / kWh).

Les études menées sur d'autres projets éoliens ont une grande variabilité : entre 3 g eq. CO<sub>2</sub> / kWh et 22 g eq. CO<sub>2</sub> / kWh. L'ADEME propose de retenir la valeur de 2 g eq. C / kWh, pour tenir compte d'un facteur de charge moyen français, soit une valeur de 7,3 g eq. CO<sub>2</sub> / kWh, un facteur 44/12 reliant les grammes équivalent Carbone aux grammes équivalent CO<sub>2</sub>.

Le bilan carbone du parc éolien en mer au large de Fécamp a été élaboré avec les outils et selon la méthode du Bilan Carbone® (Version V7.1.03). Il a été réalisé par Marie-Cécile Nessi et Céline Dam Hieu, employées d'EDF EN France, qui ont suivi la formation « Bilan Carbone® Module 1 : Acquisition des bases de la Méthode » permettant de réaliser en interne des bilans carbone bénéficiant du label « Bilan Carbone® » (attestation de formation en annexe). Ce Bilan Carbone® a été mis à jour en 2014 avec les données techniques les plus à jour à ce stade de développement du projet. La mise à jour a été réalisée en utilisant la version V7.2 du tableur Bilan Carbone®.

### 1.2. Description succincte de la méthode du Bilan Carbone®

La réalisation d'un bilan des émissions de GES peut se définir suivant 3 points :

- Définition du champ de l'étude
- Collecte et traitement des données
- Exploitation des résultats



### 1.2.3. Exploitation des résultats

Les données, représentant chacune une source d'émission de CO<sub>2</sub> ou d'autres gaz à effet de serre sont converties en quantité de carbone émis. Les gaz à effet de serre retenus dans le calcul du Bilan Carbone® sont essentiellement ceux qui font l'objet d'accords internationaux<sup>1</sup> :

- le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)
- Le méthane (CH<sub>4</sub>)
- L'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O)
- Les perfluorocarbures (C<sub>n</sub>F<sub>2n+2</sub>)
- Les hydrofluorocarbures (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>F<sub>p</sub>)
- L'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)

L'impact de chacun des gaz sur le climat est estimé par l'intermédiaire de son pouvoir de réchauffement global (PRG). Plus le PRG est élevé et plus l'effet de serre additionnel engendré par le relâchement d'un kilo de ce gaz est important. Par convention, le PRG compare les gaz à effet de serre au CO<sub>2</sub> et donc le PRG du CO<sub>2</sub> vaut 1. Pour les autres gaz à effet de serre, les différentes éditions du GIEC (Groupement Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) ont donné des valeurs différentes au fil de la dernière décennie.

La méthode Bilan Carbone® est basée sur le PRG à 100 ans figurant dans le rapport 2001 du GIEC (*Climate Change 2001, The Scientific Basis*).

L'unité de mesure des gaz à effet de serre dans le Bilan Carbone® n'est pas le PRG mais le gramme équivalent CO<sub>2</sub> (souvent noté gCO<sub>2</sub>e ou g eq. CO<sub>2</sub>) et ses multiples (le kg équivalent CO<sub>2</sub>, noté kgCO<sub>2</sub>e et la tonne équivalent CO<sub>2</sub>, notée tCO<sub>2</sub>e). L'équivalent carbone, souvent également utilisé pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre, diffère de l'équivalent CO<sub>2</sub>, d'un facteur 3,67 (valeur du rapport 44/12, facteur qui correspond au rapport : masse moléculaire du CO<sub>2</sub>/ masse atomique du carbone).

Il est à noter que l'équivalent CO<sub>2</sub> qui comptabilise toutes les émissions de gaz à effet de serre du projet sur toute la durée de vie ne doit pas être confondu avec les émissions de CO<sub>2</sub> qui comptabilisent uniquement les émissions de CO<sub>2</sub> sur une période courte.

Il n'est généralement pas possible de procéder systématiquement à des mesures directes de ces émissions de gaz à effet de serre surtout de manière prévisionnelle. Ainsi le transport des nacelles des éoliennes depuis Saint-Nazaire (leur lieu de production) jusqu'à Cherbourg (lieu de stockage provisoire envisagé avant l'installation en mer) se fait par cargo ; ce transport génère du CO<sub>2</sub> émis par la génératrice diesel du cargo. Toutefois, en fonction du bateau choisi (puissance du moteur), de la route maritime empruntée, des conditions de mer (consommation de carburant plus importante par gros temps), la consommation du moteur du bateau et donc la quantité de diesel utilisé varie.

La seule manière d'estimer ces émissions est alors de les obtenir par le calcul, à partir de données dites d'activité : nombre d'aller-retour pour transporter les nacelles des éoliennes, distance parcourue, tonnage des éoliennes, etc.

Les chiffres qui permettent de convertir les données observables dans l'entité en émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent CO<sub>2</sub>, sont appelés des facteurs d'émissions. Le facteur d'émission est une donnée fournie par le tableur Bilan Carbone® en fonction des tonnes transportées et des kilomètres parcourus. L'incertitude liée à ce facteur est également fournie par la méthode Bilan Carbone®.

---

<sup>1</sup> La méthode ne prend pas en compte l'ozone (pas d'émissions directes, gaz à durée de vie courte) et la vapeur d'eau.

Le Bilan Carbone<sup>®</sup> analyse les flux physiques qui concernent l'entité ou le projet (flux de personnes, d'objets, d'énergie, de matières premières...), et fait correspondre les émissions de gaz à effet de serre qu'ils engendrent via les facteurs d'émissions.

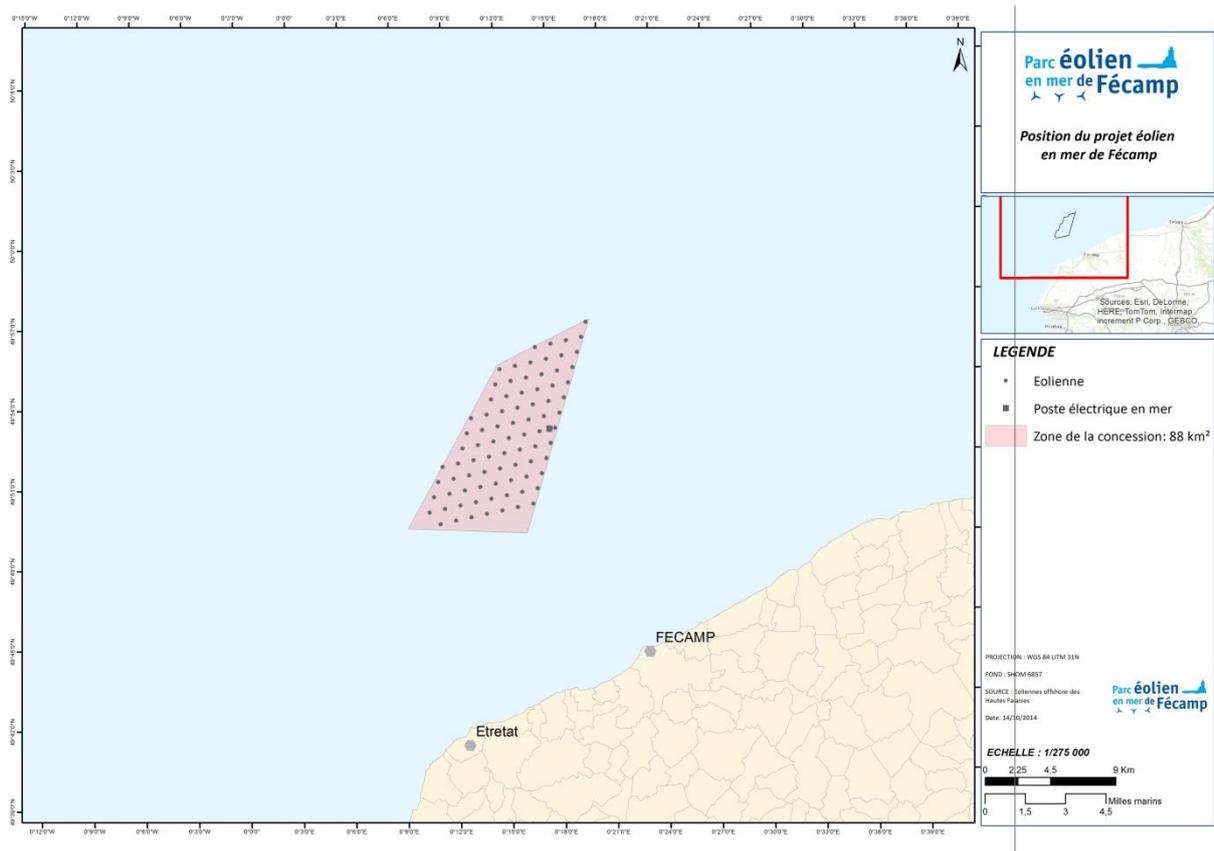
#### **1.2.4. Intérêts et limites du Bilan Carbone<sup>®</sup>**

L'intérêt principal d'un Bilan Carbone<sup>®</sup> est l'utilisation d'une unité unique. Toutes les mesures sont rapportées en équivalent CO<sub>2</sub> ce qui a pour effet de simplifier l'analyse et de la rendre efficace et compréhensible par tous. Le Bilan Carbone<sup>®</sup> a toutefois quelques limites :

- L'incertitude liée à la capacité à collecter des données de qualité peut impliquer certaines approximations et la non exhaustivité du Bilan Carbone<sup>®</sup>. Des précautions importantes concernant la collecte d'information sont donc à prendre en compte. Toutefois, une imprécision due à la non exhaustivité des données ne fera pas obstacle à la comparaison des différents moyens de productions d'électricité ;
- Le Bilan Carbone<sup>®</sup> est une évaluation qui porte sur un critère environnemental unique : l'impact sur l'effet de serre. D'autres critères, qualitatifs, seraient à prendre en compte (impact sur la biodiversité par exemple) dans une approche de développement durable. Ces éléments sont développés dans l'étude d'impact réalisée par le maître d'ouvrage.

## 2. Présentation du projet

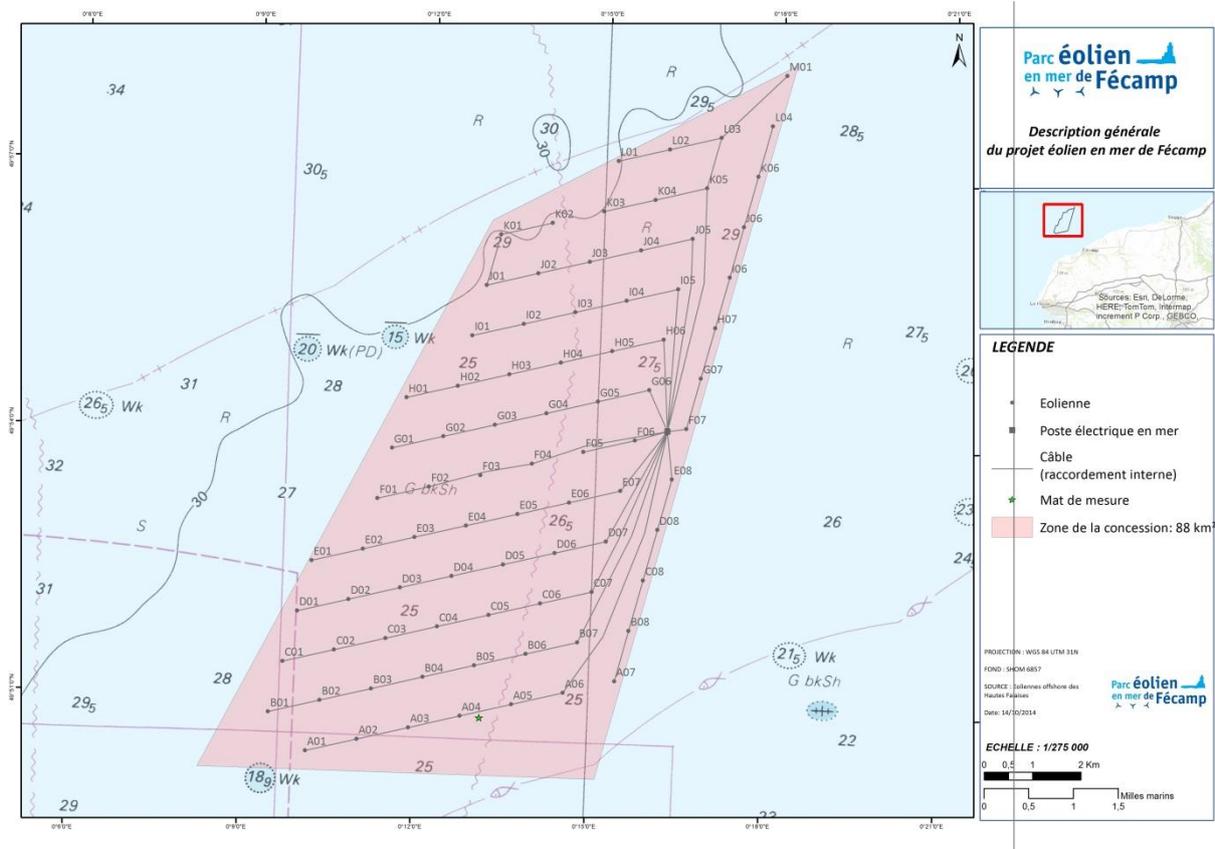
Pour atteindre les objectifs européens de 23% d'énergies renouvelables dans son mix énergétique, la France développe des parcs éoliens en mer au large de ses côtes. La commune de Fécamp située en Seine-Maritime accueillera dans quelques années un parc éolien en mer à 13 km de ses côtes. Le port de base pour l'assemblage des éoliennes avant leur installation en mer sera le port de Cherbourg et celui pour la maintenance du parc sera le port de Fécamp.



*Figure 1 : Position du projet éolien en mer de Fécamp*

Le maître d'ouvrage propose la mise en place de 83 éoliennes Alstom Haliade de puissance unitaire 6 MW pour une capacité totale du parc de 498 MW. Ce parc permettra de produire 1 800 GWh par an, soit l'équivalent de la consommation électrique de 770 000 habitants, chauffage inclus.

La superficie de la concession sera de 88 km<sup>2</sup>. La mise en service progressive du parc est prévue entre 2018 et 2020 et son exploitation devrait durer 25 ans.



**Figure 2** : Description générale du projet éolien en mer de Fécamp

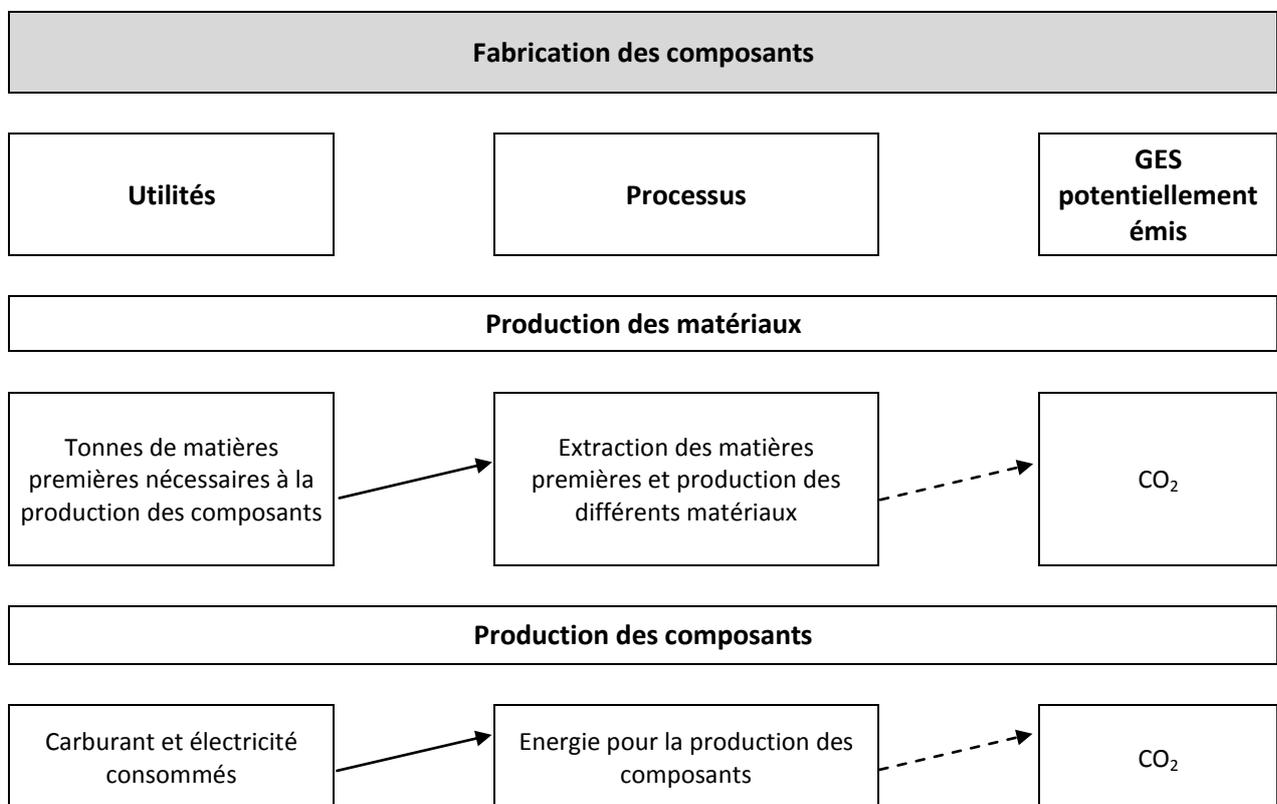
### 3. Définition de l'aire d'étude et des moyens utilisés

#### 3.1. Définition de l'aire d'étude

Cette étude vise à étudier l'impact du parc éolien en mer installé au large de la commune de Fécamp sur les émissions de gaz à effet de serre. Ces impacts sont étudiés lors des différents moments de la vie du parc. Afin d'être le plus exhaustif possible, les émissions de GES ont été calculées lors des étapes suivantes :

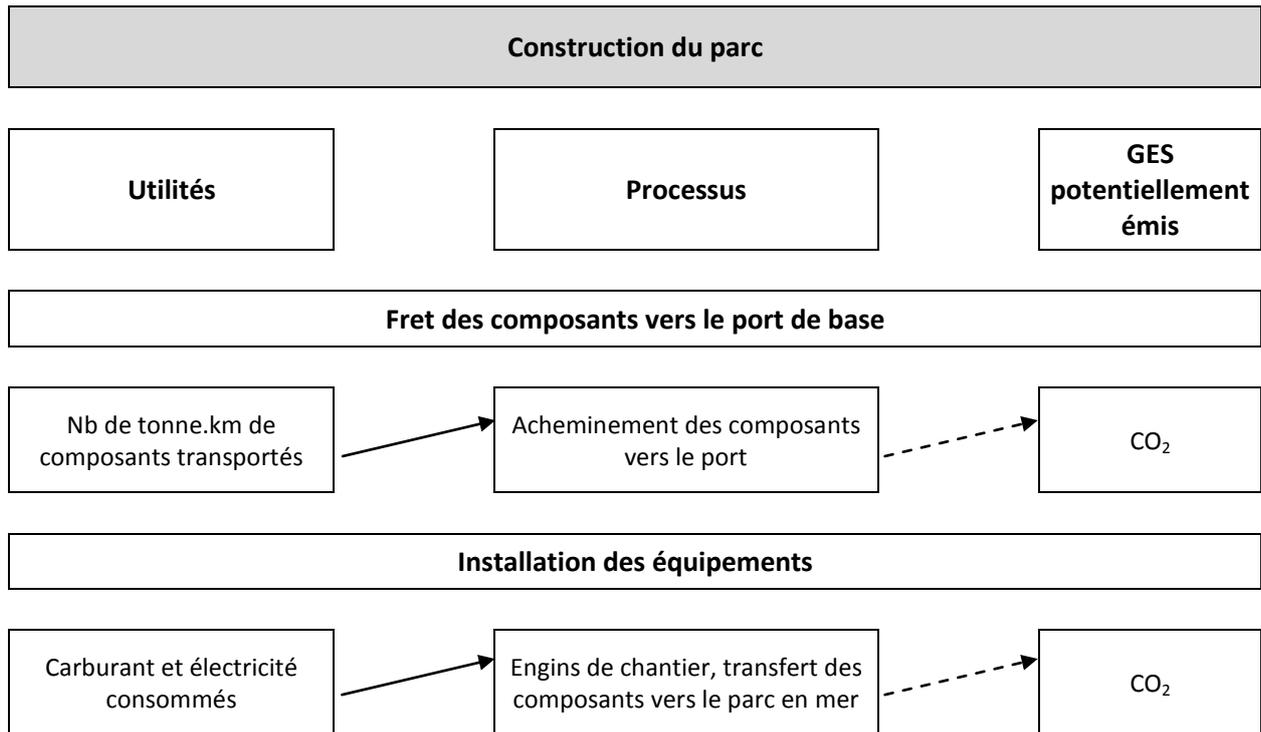
- **Développement** du projet
- **Fabrication** des éoliennes, des fondations, du poste en mer et des câbles.
- **Construction** du parc éolien offshore
- **Exploitation** du parc et de sa **maintenance**
- **Démantèlement** du parc

Les quatre dernières étapes de l'aire d'étude sont détaillées dans les diagrammes ci-dessous :

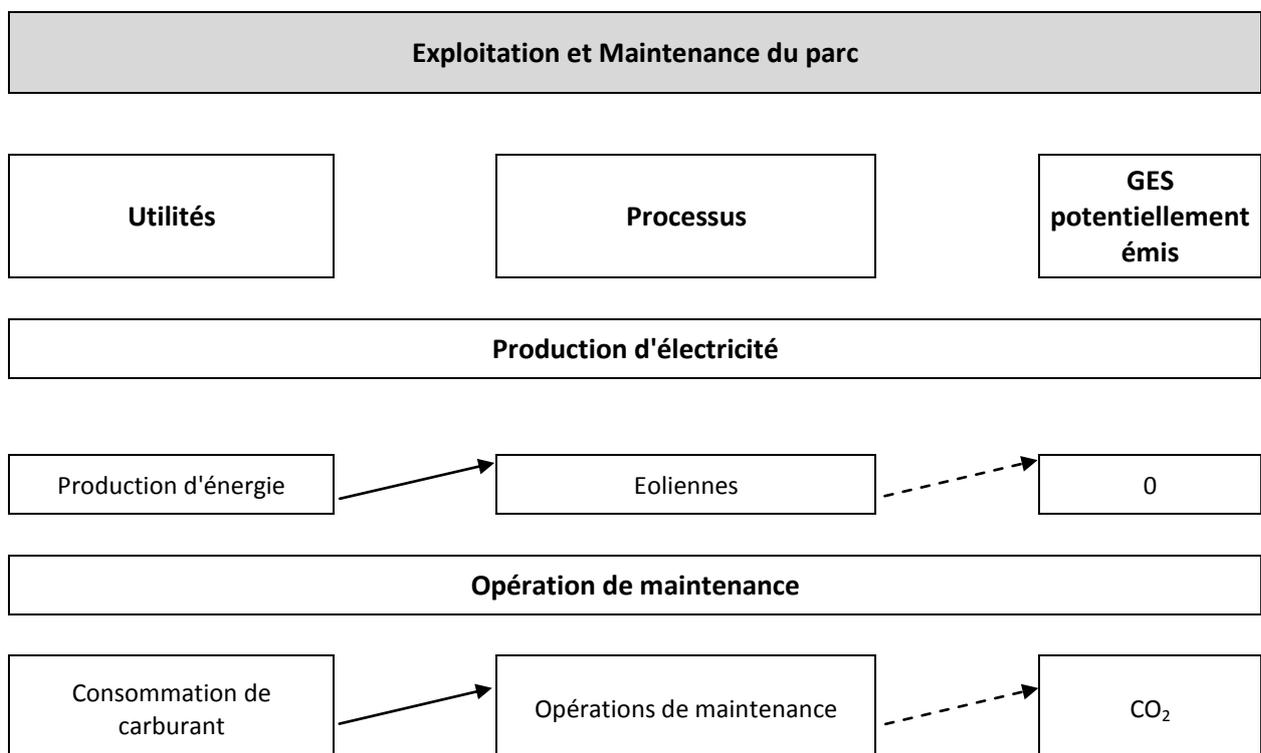


*Schéma 2 : Décomposition de l'étape « Fabrication des composants »*

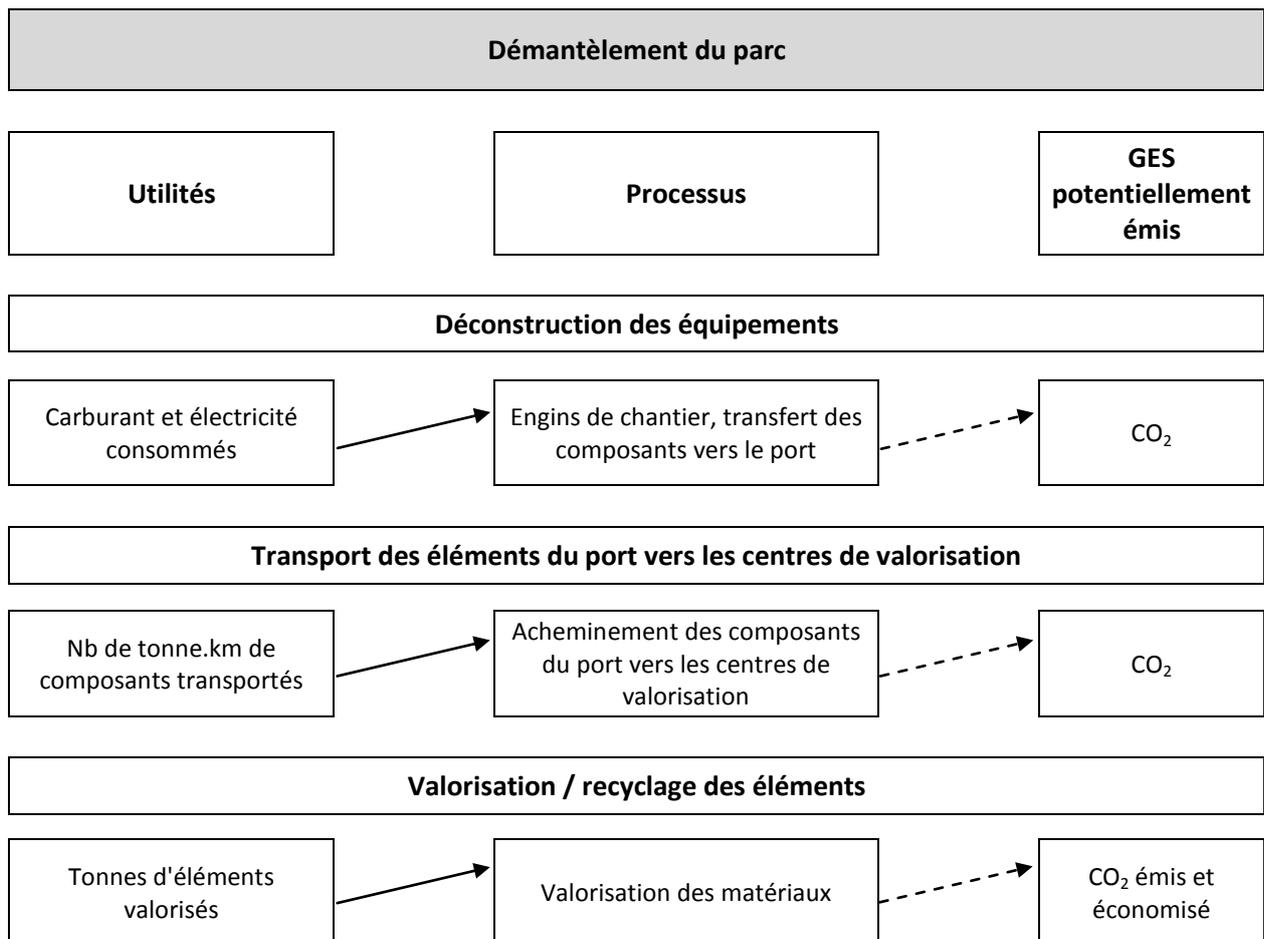
=



*Schéma 3 : Décomposition de l'étape « Construction du parc »*



*Schéma 4 : Décomposition de l'étape « Exploitation et maintenance »*



*Schéma 5 : Décomposition de l'étape « démantèlement du parc »*

### 3.2. Les moyens utilisés

Les moyens utilisés pour réaliser le Bilan Carbone® du parc de Fécamp sont les suivants :

- Tableur Bilan Carbone® V7.2. ;
- Données techniques sur le parc fournies par la société de projet Eoliennes Offshore des Hautes Falaises ;
- Données techniques sur les éoliennes fournies par Alstom.

Les facteurs d'émission sont issus de la Base Carbone de l'ADEME. Il s'agit de valeurs moyennes. Les calculs issus de la méthode Bilan Carbone® ont pour but d'identifier les ordres de grandeur des principaux gisements en GES, ils sont systématiquement accompagnés d'une incertitude.

Les résultats du bilan sont exprimés en **tonnes équivalent CO<sub>2</sub>**.

## 4. Calcul des émissions CO<sub>2</sub>

### 4.1. Développement du projet

La phase de développement du projet correspond à l'ensemble des études réalisées préalablement à l'implantation du parc éolien. Elles comprennent à la fois les étapes de réponse à l'appel d'offres, les actions de concertation et la réalisation d'études techniques et environnementales comme les études géotechniques ou l'étude d'impact.

Les émissions de gaz à effet de serre propres à cette phase de développement sont difficiles à quantifier. Le tableur Bilan Carbone® permet d'utiliser pour ce type de services un ratio monétaire afin d'obtenir un ordre de grandeur des émissions de gaz à effet de serre de ces activités qui ne constituent pas le cœur de l'impact du parc éolien en mer.

Pour l'estimation de ces émissions, la phase de développement est assimilée à un service tertiaire fortement matérialisé. Les dépenses associées à l'ensemble de la phase de développement du projet sont l'ordre de de 50 millions d'euros.

Ainsi, les émissions associées au développement du projet sont estimées à environ **5 500 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 2750 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.

Phase Développement	Emissions en t CO <sub>2</sub> e	k€ dépensés	kg CO <sub>2</sub> e par k€	Incertitude en t CO <sub>2</sub> e
Services fortement matériels	5 500	50 000	110	50%
<b>Total</b>	<b>5 500</b>			<b>2 750</b>

*Tableau 1 : Calcul des émissions de GES propres à la phase de développement du projet*

### 4.2. Fabrication des composants

De façon générale, les équipements du parc éolien sont décomposés en sous-ensembles principaux qui les constituent.

#### 4.2.1. Production des matières premières

##### 4.2.1.1. Production des matières premières propres aux éoliennes

Les éoliennes considérées sont des éoliennes ALSTOM Haliade 6MW de nouvelle génération, développées pour les conditions de l'éolien en mer. Le parc sera composé de 83 éoliennes.

Ses principales caractéristiques sont :

- Puissance unitaire : 6 MW ;
- Diamètre du rotor : 150 m ;
- Longueur des pales : 73,5 m ;
- Hauteur de la nacelle : 104 m au-dessus du niveau moyen de la mer ;
- Technologie « Pure Torque » pour la conception mécanique de la liaison rotor / nacelle de type élastique limitant la transmission d'efforts secondaires parasites à la structure et diminuant la fréquence des opérations de maintenance ;

- Technologie « Direct Drive » (c'est-à-dire « entraînement direct ») et alternateur à aimants permanents, assurant une meilleure fiabilité par l'absence de multiplicateur et permettant d'obtenir une nacelle plus compacte et légère.



Figure 3 : Vue de l'éolienne Alstom Haliade 6 MW

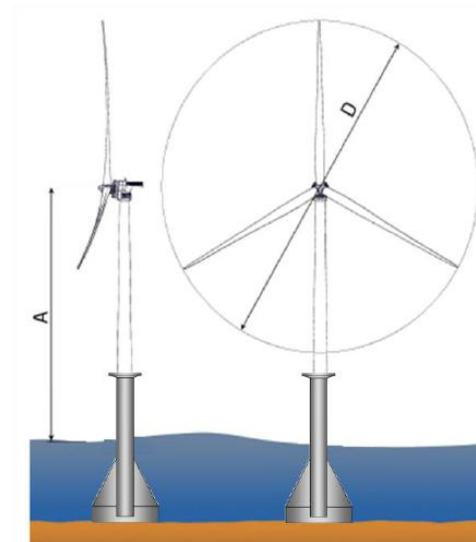


Figure 4 : Vue de côté et de face de l'éolienne Alstom Haliade 6 MW

L'éolienne est constituée d'un mât, d'une nacelle et d'un rotor comprenant trois pales. Les éléments constituant ces composants sont détaillés ci-dessous :

Ensemble	Sous-ensemble	Matières Premières	Masse (tonne)	nombre pour le parc
<b>Rotor</b>	Pales	fibres de verre	28	249
<b>Nacelle</b>	Nacelle dont génératrice	acier	356	83
<b>Mât</b>	3 sections du mât	acier	399	83
	Transformateur	cuivre	10	83
	Autres équipements électroniques	acier	13	83
<b>Peinture</b>	Peinture	polyuréthane et composites	2,8	83

Tableau 2 : Eléments constitutifs de l'éolienne Alstom Haliade 6 MW

Alstom indique utiliser un acier constitué à 80% d'acier secondaire et à 20% d'acier primaire. L'acier primaire est un acier constitué uniquement de minerai de fer neuf, alors qu'un acier secondaire est issu du recyclage de ferraille.

Ces données sont prises en compte dans le calcul du Bilan Carbone®.

De plus, pour la peinture de chaque éolienne et de sa fondation, une hypothèse de 2 m<sup>3</sup> de peinture par éolienne a été prise, soit environ 2,8 t de peinture par éolienne. La peinture est assimilable à une laque polyuréthane. Pour le calcul des émissions de carbone, on suppose donc qu'il s'agit d'un composite du polyuréthane.

#### 4.2.1.2. Production des matières premières propres aux fondations des éoliennes

Les fondations du parc éolien en mer au large de Fécamp sont de type gravitaire. Il s'agit d'une structure creuse conique en béton armé posée sur une couche de nivellement en cailloutis préalablement préparée et remplie de sable une fois sur place.

Les fondations ont une emprise au sol circulaire de 36m de diamètre à laquelle s'ajoute une extension d'environ 5m de chaque côté pour la couche de nivellement et la largeur de la protection anti affouillement sur les localisations où elle sera nécessaire.

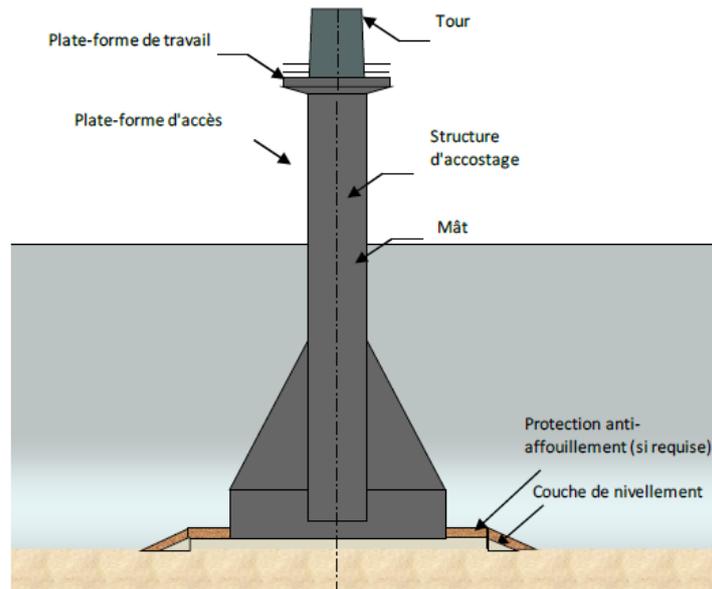


Figure 5 : Schéma d'une fondation à structure embase gravitaire

Elles sont majoritairement constituées de béton, le détail de leur composition est précisé ci-dessous :

Ensemble	Sous-ensemble	Matières Premières	Masse unitaire (tonne)	Nombre pour le parc
Fondation	Béton	béton	5 500	83
	Acier de renforcement	acier	500	83
	Ballast	sable	10 000	83
	Structure d'accostage	acier	16	83
	Passerelle	acier	40	83
	J-tubes	acier	10	152
	Anodes sacrificielles	aluminium	4,75	83
	zinc	0,25	83	

Tableau 3 : Eléments constitutifs d'une fondation de type gravitaire

Les dimensions des fondations gravitaires varient en fonction de la profondeur du lieu d'implantation. Les masses données ci-dessus correspondent à des valeurs moyennes.

Contrairement aux éoliennes, la composition acier primaire / acier secondaire de l'acier utilisé pour les fondations n'est pas connue. En France, l'acier produit est à 39,1% composé d'acier secondaire<sup>2</sup>. Pour le Bilan Carbone®, le ballast sera considéré comme étant du grave non traité. Ces données sont prises en compte dans le calcul du Bilan Carbone®.

#### 4.2.1.3. Production des matières premières propres au poste en mer

Le poste électrique en mer sert à élever la tension de l'électricité produite de 33 kV à 225 kV pour son injection sur le réseau de transport géré par RTE. Le poste est constitué des éléments suivants :

Ensemble	Sous-ensemble	Matières Premières	Poids unitaire (tonne)	Nombre pour le parc
Poste de transformation en mer	Structure	acier	1 400	1
	Equipements électriques	acier, cuivre	1 000	1
Fondation pour le poste en mer <sup>3</sup>	Jacket + pieux <sup>4</sup>	acier	1 500	1
	Peinture	polyuréthane et composites	2,8	1

Tableau 4 : Eléments constitutifs du poste électrique de livraison

Les transformateurs et les cellules sont constitués de cuivre et d'acier. La part respective de chacun de ces métaux dans ces composants n'est pas connue. Le type d'acier utilisé pour la structure du poste et sa fondation, primaire ou secondaire, n'est pas connu non plus. Il a donc été considéré que, comme pour les fondations, l'acier utilisé était composé à 39,1% d'acier secondaire, ce qui correspond à la moyenne française. De plus et afin d'être conservateur, le bilan carbone des émissions relatives à ces éléments considèrera le métal le plus impactant, soit le cuivre. De la même façon, les câbles sont considérés comme étant entièrement constitués d'aluminium, matériau ayant l'impact CO<sub>2</sub> le plus important.

<sup>2</sup> Données issues du *Steel Statistical Yearbook 2013* de la *Worldsteel Association*

<sup>3</sup> Dans le cadre de ce Bilan Carbone®, une fondation de type jacket a été considérée pour le poste en mer, les émissions associées étant supérieures à celles dans le cas d'une fondation gravitaire

<sup>4</sup> La fondation pourrait également être, comme les éoliennes, une fondation gravitaire. Le cas majorant pour les émissions a été retenu pour le présent Bilan Carbone®, à savoir la fondation acier.



*Figure 6 : Poste électrique en mer du parc éolien DONG Energy de Walney*

#### **4.2.1.4. Production des matières premières propres aux câbles**

Deux types de câbles 33kV sont mis en place entre les éoliennes et le poste de transformation, des câbles dont la section fait 240 mm<sup>2</sup> et d'autres dont elle fait 630 mm<sup>2</sup>. Les câbles sont constitués d'aluminium, de cuivre et de PEHD. La constitution précise des câbles (cuivre ou aluminium) n'est pas encore connue à ce stade de développement du projet. Afin de se placer dans le cas le plus pénalisant, les câbles sont considérés comme étant entièrement constitués d'aluminium, dont le facteur d'émission est le plus élevé. Les quantités de câbles mises en place sur le projet de parc éolien au large de Fécamp sont indiquées ci-dessous :

- Câbles section 240 mm<sup>2</sup> : 1 520 tonnes ;
- Câbles section 630 mm<sup>2</sup> : 2 320 tonnes.

#### **4.2.1.5. Bilan des émissions des matières premières**

Les données recueillies précédemment sont ensuite utilisées dans le tableur de calcul Bilan Carbone<sup>®</sup> pour les matières premières. Les facteurs d'émission associés à chaque matière première intègrent à la fois l'extraction des matières premières brutes, leur transport vers le lieu de production et la production du matériau à partir du minerai ou de produits recyclés.

En conclusion, les émissions liées à la production des matières premières pour le parc éolien au large de Fécamp sont estimées à environ **332 300 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 20 900 tonnes eq. CO<sub>2</sub>. Le détail par famille de matériau est présenté ci-après.

Intrants – Matières premières	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Métaux	263 790	79%	18 846	7%
Plastique	1 035	0,3%	409	40%
Verre	14 816	4%	2 963	20%
Matériaux de construction	52 622	16%	8 411	16%
<b>Total</b>	<b>332 262</b>	<b>100%</b>	<b>20 854<sup>5</sup></b>	<b>6%</b>

*Tableau 5 : Calcul des émissions de GES propres à la fabrication des matières premières*

Le détail par famille est ci-dessous :

Métaux		Emissions t CO <sub>2</sub> e	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO <sub>2</sub> e par tonne
Eoliennes	Acier	96 763	63 744	80%	1 518
	Cuivre	2 434	830	<sup>6</sup>	2 933
Poste en mer	Cuivre	2 933	1 000	<sup>5</sup>	2 933
	Acier	6 881	2 900	39,1%	2 373
Fondations	Acier	113 107	47 668	39,1%	2 373
	Aluminium	3 874	394	<sup>5</sup>	9 827
	Zinc	61	21	<sup>5</sup>	2 933
Cables	Aluminium	37 736	3 840	<sup>5</sup>	9 827
<b>Total</b>		<b>263 790</b>			

Plastiques		Emissions t CO <sub>2</sub> e	Tonnes utilisées	kg CO <sub>2</sub> e par tonne
Eoliennes	Composites et polyuréthane	1 023	232	4 400
Poste électrique en mer	Composites et polyuréthane	12	3	4 400
<b>Total</b>		<b>1 035</b>		

Verre		Emissions t CO <sub>2</sub> e	Tonnes utilisées	kg CO <sub>2</sub> e par tonne
Eoliennes	Fibre de verre	14 816	6 972	2 125
<b>Total</b>		<b>14 816</b>		

Matériaux de construction - Vrac		Emissions t CO <sub>2</sub> e	Tonnes utilisées	kg CO <sub>2</sub> e par tonne
Fondations éoliennes	Béton	40 72	456 500	88
Fondations éoliennes	Grave non traitée	12 450	830 000	15
<b>Total</b>		<b>52 622</b>		

*Tableau 6 : Détail du calcul des émissions de GES propres à la fabrication des matières premières*

<sup>5</sup> A noter que dans le Bilan Carbone®, l'incertitude totale est calculée automatiquement par le tableur comme un écart-type, elle est inférieure à la somme de l'incertitude pour chaque composant

<sup>6</sup> En l'absence d'information à ce stade, il a été considéré un taux de recyclage de 0%.

## 4.2.2. Production des composants

Aucune donnée d'Alstom n'est pour le moment disponible sur cette étape de fabrication des composants des éoliennes. Il n'est donc pas possible d'évaluer avec précision la consommation d'énergie liée au transport maritime des matières premières depuis les centres de stockage vers les sites de construction. Une étude réalisée entre 2001 et 2003 dans le cadre du projet européen ECLIPSE (*Environmental and ecological life cycle inventories for present and future power systems in Europe*), auquel EDF R&D a participé, a permis d'estimer les consommations totales d'énergie pour la construction des composants d'une éolienne en mer de puissance unitaire 2,5 MW ayant un mât acier tubulaire :

- Consommation électrique : 0,39 TJ / éolienne ;
- Consommation fioul domestique : 260 kg / éolienne ;
- Consommation gaz naturel : 6 629 m<sup>3</sup> / éolienne.

Les éoliennes installées sur le parc éolien en mer au large de Fécamp ont une puissance unitaire de 6 MW. Il est donc possible proportionnellement d'obtenir l'énergie nécessaire à la fabrication des 83 éoliennes Alstom Haliade 150 :

- Consommation électrique : 77,7 TJ, soit 21 580 000 kWh ;
- Consommation fioul domestique : 51,8 tonnes ;
- Consommation gaz naturel : 1 320 497 m<sup>3</sup>, soit 12 795 369 kWh PCI.

Ces données permettent donc de déterminer les émissions de gaz à effet de serre propres à la fabrication des composants des éoliennes qui sont estimées à environ **5 000 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 184 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.

Fabrication des composants	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Combustibles	3 277	66%	133	4%
Electricité achetée	1 683	34%	126	7%
<b>Total</b>	<b>4 961</b>	<b>100%</b>	<b>184</b>	<b>4%</b>

*Tableau 7 : Détail du calcul des émissions de GES propres à la fabrication des composants de l'Haliade 150*

## 4.3. Construction du parc

### 4.3.1. Transport des composants jusqu'au port d'assemblage

Le port d'assemblage des éoliennes avant leur installation en mer sur le projet de Fécamp est le port de Cherbourg. Il est considéré dans le Bilan Carbone® que l'ensemble des composants<sup>7</sup> sont livrés au port de Cherbourg avant d'être transportés en mer vers le lieu du parc éolien en mer au large de Fécamp dans le cadre de la construction réelle du parc.

Les pales et les mâts sont produits à Cherbourg. La nacelle et la génératrice sont fabriquées et assemblées à Saint-Nazaire, avant d'être livrées à Cherbourg par la mer.

Les fondations sont fabriquées au Havre.

Les émissions associées au transport des équipements entre les ports et le site en mer au large de Fécamp sont intégrées dans l'étape d'installation des équipements et de construction du parc présentée dans la partie 4.3.2.

<sup>7</sup> A l'exception des fondations gravitaires, construites sur le port du Havre.

### **Fret routier**

La structure d'accostage et les J-tubes sont supposés être transportés par camions. Les passerelles des fondations sont supposées être transportées sur des faibles distances par des ensembles articulés en raison de leur poids unitaire inférieur à 40 tonnes et les cellules 225 kV sont également transportées par des ensembles articulés mais sur des longues distances.

### **Fret ferroviaire**

Les équipements transportés par train sont considérés pour le calcul comme des équipements moyennement denses.

### **Fret fluvial**

Les composants transportés par voie fluviale sont supposés être transportés par des automoteurs de petite capacité (<400 tonnes).

### **Fret maritime**

Les différents équipements sont transportés par cargos entre les différents ports et le port de Cherbourg.

Les émissions de gaz à effet de serre relatives au transport des différents composants vers le site d'assemblage sont estimées à environ **3 700 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 1 600 tonnes eq. CO<sub>2</sub>. Le détail du calcul par type de fret est présenté ci-dessous :

Fret vers port de construction	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Fret routier entrant	10	0,3%	2	21%
Fret ferroviaire entrant	123	3%	86	70%
Fret maritime et fluvial entrant	3 577	96%	1 578	44%
<b>Total</b>	<b>3 711</b>	<b>100%</b>	<b>1 580</b>	<b>43%</b>

*Tableau 8 : Calcul des émissions de GES propres au fret des composants vers le port de construction*

### **4.3.2. Energie pour le levage et la construction du parc**

L'impact de la construction du parc sur les émissions de gaz à effet de serre est principalement dû aux émissions associées à l'utilisation de navires pour l'installation des différents équipements. Le nombre de jours de navires nécessaires à la construction du parc éolien en mer au large de Fécamp a été évalué par l'équipe projet aux délais suivants :

- L'équivalent de 241 jours de navire consommant 20 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour l'installation des éoliennes et du poste en mer, dont 82 jours de standby.
- L'équivalent de 128 jours de navire consommant 25 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour l'installation des câbles, dont 37 jours de standby.
- L'équivalent de 1000 jours de navire consommant 300 L / heure de Marine Diesel Oil (MDO) pour l'installation des fondations, dont 200 jours de standby
- L'équivalent de 2 ans de 7 petits navires consommant 200L/h/navire de Marine Diesel Oil (MDO) pour la mise en service et les installations diverses, ces navires étant en standby 30% du temps.

Le stand-by correspond à l'aléa météo pour l'installation des différents équipements. Ainsi, lors de ces journées aléa météo, les navires ne pourront pas quitter le port pour installer les équipements ou

bien ils seront immobilisés au niveau du parc en mer. Une consommation de carburant résiduelle est tout de même considérée lors de ces journées standby pour les gros navires : 5 tonnes de MGO.

Ces données permettent d'estimer la consommation de carburant propre à la construction du parc éolien en mer au large de Fécamp :

- 6 050 tonnes de fioul lourd pour les gros navires
- 22 930 m<sup>3</sup> de fioul domestique pour les petits navires

L'impact CO<sub>2</sub> de la construction du parc peut donc être estimé à **96 400 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 3 300 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.

Construction du parc	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Fioul domestique, France	74 382	77%	3 141	5%
Fioul lourd, France	22 008	23%	962	5%
<b>Total</b>	<b>96 391</b>	<b>100%</b>	<b>3 285</b>	<b>3%</b>

*Tableau 9 : Calcul des émissions de GES propres à la construction du parc éolien en mer*

## 4.4. Exploitation et maintenance du parc

### 4.4.1. Production d'électricité

La seule production d'électricité grâce aux éoliennes n'a pas d'impact sur les émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, aucun combustible ni aucune matière première n'est utilisée pour produire l'électricité. Seul le vent fait fonctionner les éoliennes.

En revanche, des opérations de maintenance peuvent avoir lieu au cours de l'exploitation du parc et celles-ci sont à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Ces émissions sont étudiées dans le paragraphe suivant.

### 4.4.2. Opérations de maintenance

Le service logistique d'Alstom estime que la consommation annuelle de carburant liée aux opérations de maintenance d'une turbine est de 7500 L. Ainsi l'exploitation des 83 éoliennes pendant 25 ans entrainera la consommation d'environ 15 560 m<sup>3</sup> de carburant.

Les opérations de maintenance du parc entraineront donc des émissions de l'ordre de **50 500 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 2 100 tonnes eq. CO<sub>2</sub>. L'impact carbone associé à la consommation de ce carburant est présenté ci-dessous :

Exploitation et maintenance	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Combustible	50 484	100%	2 132	4%
<b>Total</b>	<b>50 484</b>	<b>100%</b>	<b>2 132</b>	<b>4%</b>

*Tableau 10 : Calcul des émissions de GES propres aux opérations de maintenance du parc éolien en mer*

## 4.5. Démantèlement du parc

Lors du démantèlement du parc, les éléments sont retirés (éoliennes, poste électrique en mer, câbles sous-marins, fondations, etc.) pour être recyclés et valorisés dans la mesure du possible.

### 4.5.1. Energie nécessaire pour la déconstruction des équipements du parc

En première approche, les consommations des navires de chantier et le nombre de jours de déconstruction sont considérés comme identiques à ceux de la construction (cf 4.3.2.).

Ces données permettent d'estimer la consommation de carburant propre à la déconstruction du parc éolien en mer au large de Fécamp :

- 6 050 tonnes de fioul lourd pour les gros navires ;
- 22 930 m<sup>3</sup> de fioul domestique pour les petits navires.

L'impact CO<sub>2</sub> de la déconstruction du parc peut donc être estimé à **96 400 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 3 300 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.

Construction du parc	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Fioul domestique, France	74 382	77%	3 074	5%
Fioul lourd, France	22 008	23%	950	5%
<b>Total</b>	<b>96 391</b>	<b>100%</b>	<b>3 285</b>	<b>3%</b>

*Tableau 11 : Calcul des émissions de GES propres à la déconstruction du parc éolien en mer*

### 4.5.2. Transport des différents éléments du port vers les centres de valorisation des matériaux

L'étape précédente a pris en compte le transfert des différents équipements démantelés vers le port. Les volumes de matériaux à transporter puis à valoriser sont présentés ci-dessous :

Matériau	poids à transporter (tonnes)	lieu centre valorisation	km route
Acier issu à 80% du recyclage	63 744	régional et régions limitrophes	250
Acier issu à 39,1% du recyclage	50 568	régional et régions limitrophes	250
fibres de verre	6 972	régional	50
cuiivre	1 830	régional	50
aluminium	3 899	régional	50
zinc	3	régional	50
béton	456 500	régional	50
ballast	830 000	réutilisé sur place	

*Tableau 12 : Poids des matériaux à valoriser suite au démantèlement du parc éolien en mer*

Le ballast contenu dans les fondations sera laissé sur place. Le béton sera concassé et l'acier contenu dedans valorisé, ce dernier est donc pris en compte dans le volume d'acier à valoriser.

Les centres de valorisation seront situés en Normandie. La distance retenue pour le transport des matériaux du port vers les centres de valorisation est donc de 50 km. Les matériaux à valoriser seront transportés en camion bennes.

Pour l'acier dont le volume à recycler est important, il sera évacué régionalement mais également sur les régions limitrophes pour que les ferrailleurs puissent absorber le volume. Une distance de 250 km est donc retenue.

L'impact du transport de ces matériaux en fin de vie est d'environ **6 100 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 3 300 tonnes eq. CO<sub>2</sub>. Il correspond à du fret routier :

Fret vers centres de valorisation des matériaux	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Fret routier sortant	6 091	100%	3 252	53%
<b>Total</b>	<b>6 091</b>	<b>100%</b>	<b>3 252</b>	<b>53%</b>

*Tableau 13 : Calcul des émissions de GES propres au transport des matériaux à valoriser vers les centres de traitement*

#### 4.5.3. Valorisation des matériaux

Le traitement de valorisation des matériaux est consommateur d'énergie. Des émissions de gaz à effet de serre sont donc associées à ce processus.

Le concassage du béton est également consommateur de carburant, mais est indispensable pour permettre la valorisation de l'acier pris dans le béton et la réutilisation du béton pour la voirie par exemple.

Les consommations de carburant sont estimées à 500L de gazole par jour pour une capacité de concassage de 800 m<sup>3</sup> par jour soit 1600 tonnes par les entreprises de concassage. Ces consommations de carburant comprennent la consommation du concasseur et celle des pelles associées qui trient les matériaux, les pré-broient et chargent le concasseur. Ainsi, le concassage des 457 000 t de béton entrainera une consommation de 143 m<sup>3</sup> de gazole.

L'impact carbone de cette étape est de l'ordre de **5 000 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** avec une incertitude de 1 300 tonnes eq. CO<sub>2</sub>, comme indiqué ci-dessous :

Traitement des matériaux en fin de vie	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	%	t CO <sub>2</sub> e	%
Métaux	3 961	85%	1 344	34%
Combustible	455	10%	19	4%
Verre	230	5%	115	50%
<b>Total</b>	<b>4 646</b>	<b>100%</b>	<b>1 349</b>	<b>29%</b>

*Tableau 14 : Calcul des émissions de GES propres à la valorisation des matériaux*

Le détail pour les métaux valorisés est présenté ci-dessous :

Métaux	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO <sub>2</sub> e émis par tonne	Emissions en t CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e évité par tonne	Emissions évitées en t CO <sub>2</sub> e
Acier	63 744	80%	33	<b>2 104</b>	- 167	<b>- 10 658</b>
Acier	50 568	39,1%	33	<b>1 669</b>	- 509	<b>- 25 745</b>
Aluminium	3 899		33	<b>129</b>	- 3 726	<b>- 14 527</b>
Cuivre	1 830		33	<b>60</b>	0	<b>0</b>
<b>Total</b>				<b>3 961</b>		<b>- 50 930</b>

*Tableau 15 : Détail des calculs des émissions de GES propres à la valorisation des matériaux*

Par ailleurs, le processus de recyclage des métaux leur permet d'être ensuite réutilisés. Ce phénomène peut donc se traduire par une économie de plus de **50 000 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** comme indiqué ci-dessous.

Economies revendiquées (valorisation)	t CO <sub>2</sub> e
Emissions évitées métaux	- 50 930
<b>Total</b>	<b>- 50 930</b>

*Tableau 16 : Calcul des émissions de GES évitées grâce au recyclage des métaux*

## 5. Bilan

En conclusion, les émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer au large de Fécamp sont estimées à environ **600 500 tonnes eq. CO<sub>2</sub>** pour l'ensemble de son cycle de vie, avec une incertitude de près de 22 000 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.

Le détail par étape est indiqué ci-dessous :

Bilan des émissions de gaz à effet de serre	Emissions		Incertitudes	
	t CO <sub>2</sub> e	Relatives	t CO <sub>2</sub> e	%
<b>Phase développement</b>	5 500	1%	2 750	50%
<b>Matières premières</b>	332 262	55%	20 854	6%
<b>Fabrication des composants</b>	4 961	1%	183	4%
<b>Construction du parc</b>	96 391	16%	3 285	3%
<b>Exploitation et maintenance</b>	50 484	8%	2 132	4%
<b>Déconstruction du parc</b>	96 391	16%	3 285	3%
<b>Fret</b>	9 802	2%	13 616	37%
<b>Valorisation des matériaux</b>	4 646	1%	1 349	29%
<b>Total</b>	<b>600 436</b>	<b>100%</b>	<b>21 989</b>	<b>4%</b>

Tableau 17 : Bilan des émissions de GES du parc éolien en mer

Les matériaux nécessaires à la construction des équipements représentent donc plus de 50% des émissions de gaz à effet de serre totales du parc sur l'ensemble de son cycle de vie.

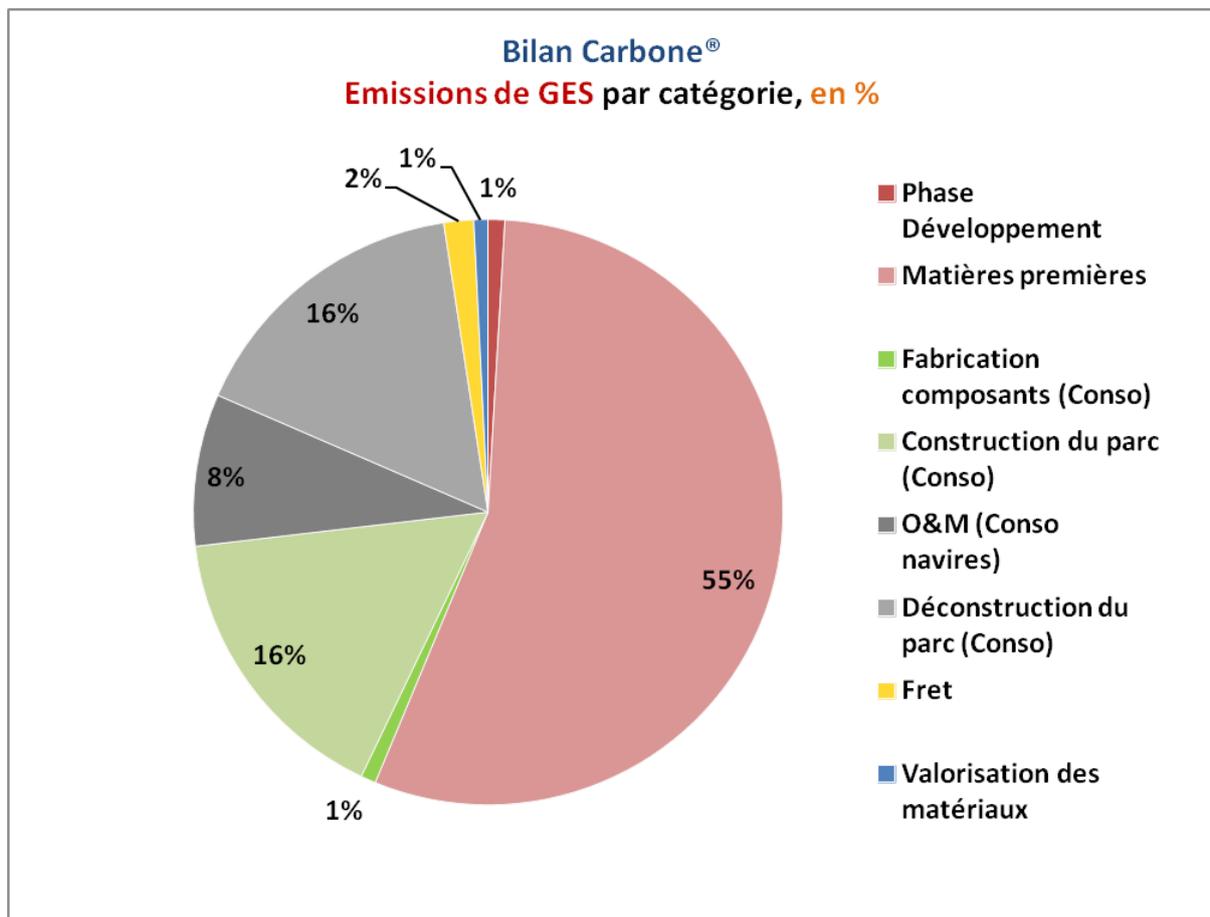


Figure 7 : Répartition des émissions de GES en équivalent CO<sub>2</sub> par catégorie

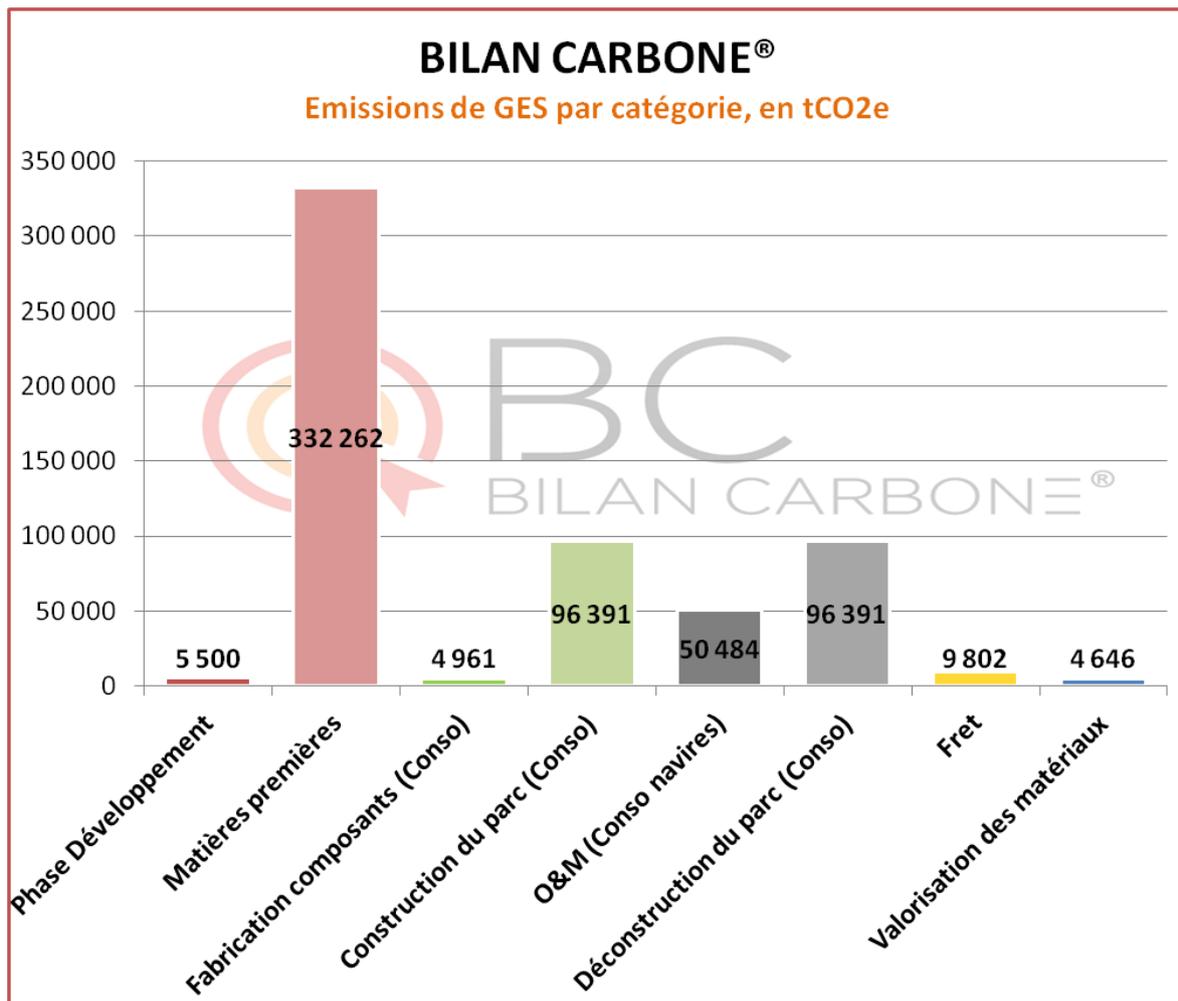


Figure 8 : Emissions de GES en tonnes équivalent CO<sub>2</sub> par catégorie

En conclusion les émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer au large de Fécamp sont estimées à environ 600 500 tonnes eq. CO<sub>2</sub> pour l'ensemble de la durée de vie du parc avec une incertitude de près de 22 000 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.

La valorisation des métaux en fin de vie permet d'éviter 51 000 tonnes eq.CO<sub>2</sub> d'émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie du parc en mer, à l'exception des étapes de fret des matériaux vers l'usine de fabrication des composants des éoliennes.

Avec ses 83 éoliennes, la production d'électricité attendue pour les 25 ans d'exploitation du parc est estimée à 45 000 GWh.

**Les émissions de GES ramenées au kWh produit sont donc de**  
**13,3 g eq. CO<sub>2</sub> / kWh produit**  
**+/- 0,49 g eq. CO<sub>2</sub> / kWh produit**

Cette valeur est à comparer à d'autres sources de production d'électricité. L'ADEME et l'association Bilan Carbone® recensent dans la base Carbone de l'ADEME les valeurs moyennes des émissions CO<sub>2</sub>

associées à la production d'électricité dans différents pays. Ces valeurs moyennes sont présentées ci-dessous :

Type de production d'électricité	Emissions CO <sub>2</sub> en g eq. CO <sub>2</sub> / kWh produit
France - moyenne	72
Union Européenne - moyenne	306
Parc éolien en mer au large de Fécamp	<b>13</b>
Parc éolien terrestre – moyenne ADEME	3 à 22
Cycle combiné à gaz	350 à 400
Centrale à charbon	800 à 1000

*Tableau 18 : Emissions de GES en tonnes eq. CO<sub>2</sub> des différents types de production d'électricité*

## Annexe : Attestations de formation



### ATTESTATION DE FORMATION

Cette attestation ne constitue pas une licence permettant de réaliser des prestations Bilan Carbone®

**Mademoiselle LOUVEL Marie-Cécile**

a participé à la formation : **Acquisition des bases de la méthode Bilan Carbone®**

Date : du 18 au 19 novembre 2009

Durée : 14 heures

Lieu : Mercure Porte d'Orléans - 13 rue François Ory - 92120 MONTROUGE

Signature du stagiaire Fait à Angers, le 19 novembre 2009



Anne GOBBEY  
Chargée de Formation



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie  
Siège social : 20, avenue de Grésillé – BP 90406 – 49004 – Angers Cedex 01 – RCS ANGERS 385 290 309 00454 Code APE : 751 E



### ATTESTATION DE FORMATION

Je soussigné, François KORNMANN, Directeur général de l'Institut de Formation Carbone, atteste que :

**Mme CELINE DAM HIEU**

**EDF EN FRANCE**

a participé à la session de formation :

**Bilan Carbone® : Acquisition des bases de la méthode -V7**

Date : du 16/09/2014 au 17/09/2014

Durée : 16h00

Lieu : Paris/ Montreuil - - PARIS/ MONTREUIL

Signature du Participant Fait à Paris, le 17/09/2014





Institut de Formation Carbone – [www.if-carbone.com](http://www.if-carbone.com)