

Bilan Carbone[®]
du parc éolien en mer au large de
Saint-Nazaire



Octobre 2014

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 ₂	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	17
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	20
4.5.1.	Energie nécessaire pour la déconstruction des équipements du parc	20
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.....	23
	Annexe : Attestations de formation	26

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 est de diviser par quatre ou plus, d'ici 2050, les émissions de CO₂ par rapport aux émissions réalisées en 1990.

EDF EN France et Dong Energy prévoient *via* leur société Parc du Banc de Guérande d'installer un parc éolien en mer au large de la commune de Saint-Nazaire (44).

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 CO₂ (t eq. CO₂) ainsi qu'en gramme équivalent CO₂ par kWh produit (g eq. CO₂ / kWh).

Les études menées sur d'autres projets éoliens ont une grande variabilité : entre 3 g eq. CO₂ / kWh et 22 g eq. CO₂ / 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. CO₂ / kWh, un facteur 44/12 reliant les grammes équivalent Carbone aux grammes équivalent CO₂.

Le bilan carbone du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire 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

1.2.1. Définition du champ d'étude

La méthodologie Bilan Carbone® repose sur un « cycle de vie » complet. Le Bilan Carbone® prend en compte toutes les émissions du projet « du berceau à la tombe » c'est-à-dire :

- les émissions liées à la réalisation des études préalables réalisées lors de la phase de **développement** du projet,
- les émissions liées à la **fabrication** des différents équipements du parc (matières premières, énergie pour la fabrication des composants),
- les émissions liées à la phase de **construction** de la centrale éolienne (fondations, éoliennes, poste électrique en mer),
- les émissions liées au **fret** des éléments et matériaux,
- les émissions engendrées lors des phases **d'exploitation et de maintenance** du parc,
- les émissions liées au **démantèlement** de l'installation et à la fin de vie des composants.



Schéma 1 : Périmètre du Bilan Carbone® (source Bilan Carbone®)

1.2.2. Collecte des données

Les données sont rassemblées au sein d'un tableur Excel qui répertorie tous les processus nécessaires à l'activité. Toutes les émissions sont calculées, qu'elles aient lieu directement au niveau du parc éolien en mer ou indirectement chez les clients ou les fournisseurs, dès lors qu'elles correspondent au processus nécessaire à l'activité du parc.

1.2.3. Exploitation des résultats

Les données, représentant chacune une source d'émission de CO₂ 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 internationaux¹ :

- le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂)
- Le méthane (CH₄)
- L'oxyde nitreux (N₂O)
- Les perfluorocarbures (C_nF_{2n+2})
- Les hydrofluorocarbures (C_nH_mF_p)
- L'hexafluorure de soufre (SF₆)

L'impact de chacun des gaz à effet de serre 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 CO₂ et donc le PRG du CO₂ 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 CO₂ (souvent noté gCO₂e ou g eq. CO₂) et ses multiples (le kg équivalent CO₂, noté kgCO₂e et la tonne équivalent CO₂, notée tCO₂e). L'équivalent carbone, souvent également utilisé pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre, diffère de l'équivalent CO₂, d'un facteur 3,67 (valeur du rapport 44/12, facteur qui correspond au rapport : masse moléculaire du CO₂ / masse atomique du carbone).

Il est à noter que l'équivalent CO₂ 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 CO₂ qui comptabilisent uniquement les émissions de CO₂ 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 pales des éoliennes depuis Cherbourg (leur lieu de production) jusqu'au port qui servira de base lors de la construction du parc se fait par cargo ; ce transport génère du CO₂ 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 pales 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 CO₂, 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®.

¹ 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® 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 ®

L'intérêt principal d'un Bilan Carbone® est l'utilisation d'une unité unique. Toutes les mesures sont rapportées en équivalent CO₂ ce qui a pour effet de simplifier l'analyse et de la rendre efficace et compréhensible par tous. Le Bilan Carbone® 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®. Des précautions importantes concernant la collecte d'informations 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 production d'électricité ;
- Le Bilan Carbone® 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 à l'horizon 2020, la France développe des parcs éoliens en mer au large de ses côtes. Il est prévu d'installer un parc éolien au large de Saint-Nazaire, à plus de 12 km des côtes.

Le port de base pour l'installation du parc sera le port de Saint-Nazaire.

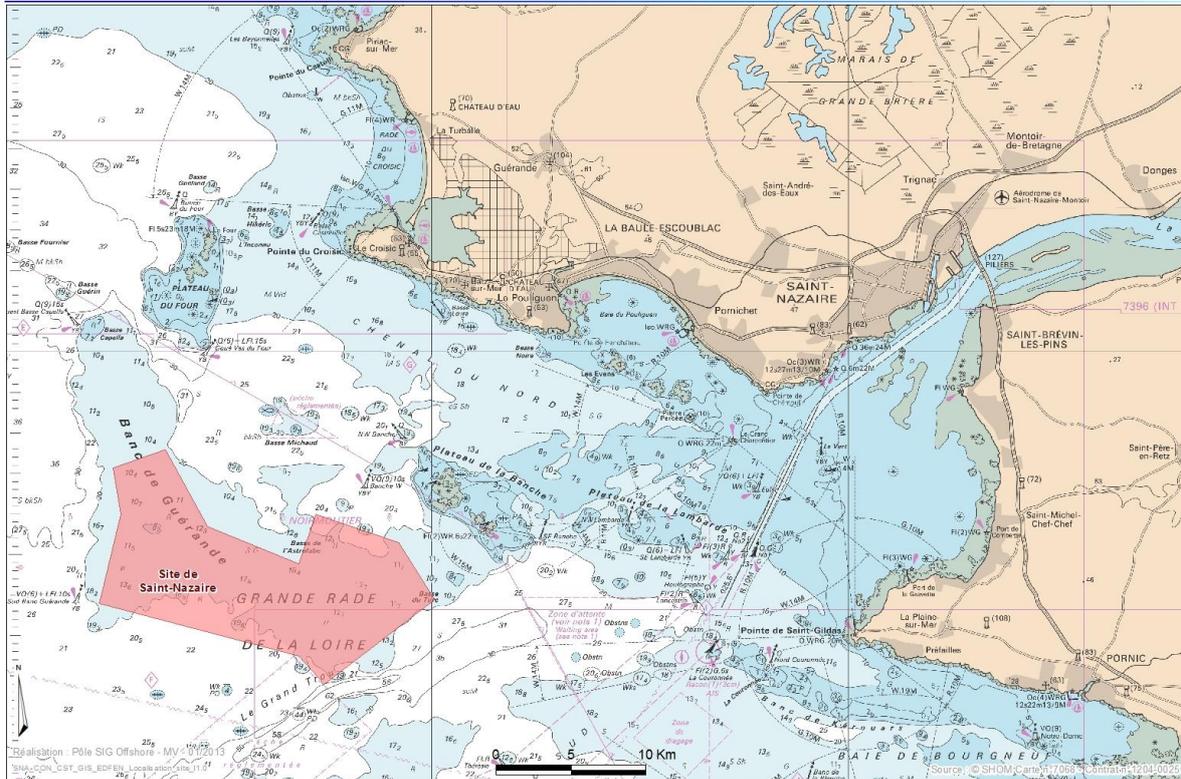


Figure 1 : Implantation du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire

Le maître d'ouvrage propose la mise en place de 80 éoliennes Alstom Haliade 150 de puissance unitaire 6 MW pour une capacité totale du parc de 480 MW. Ce parc permettra de produire environ 1 735 GWh par an, soit l'équivalent de la consommation électrique de plus de 700 000 habitants, chauffage inclus.

Les éoliennes seront implantées sur une surface de 78 km². La mise en service progressive du parc est prévue à partir de 2018 et son exploitation devrait durer 25 ans.

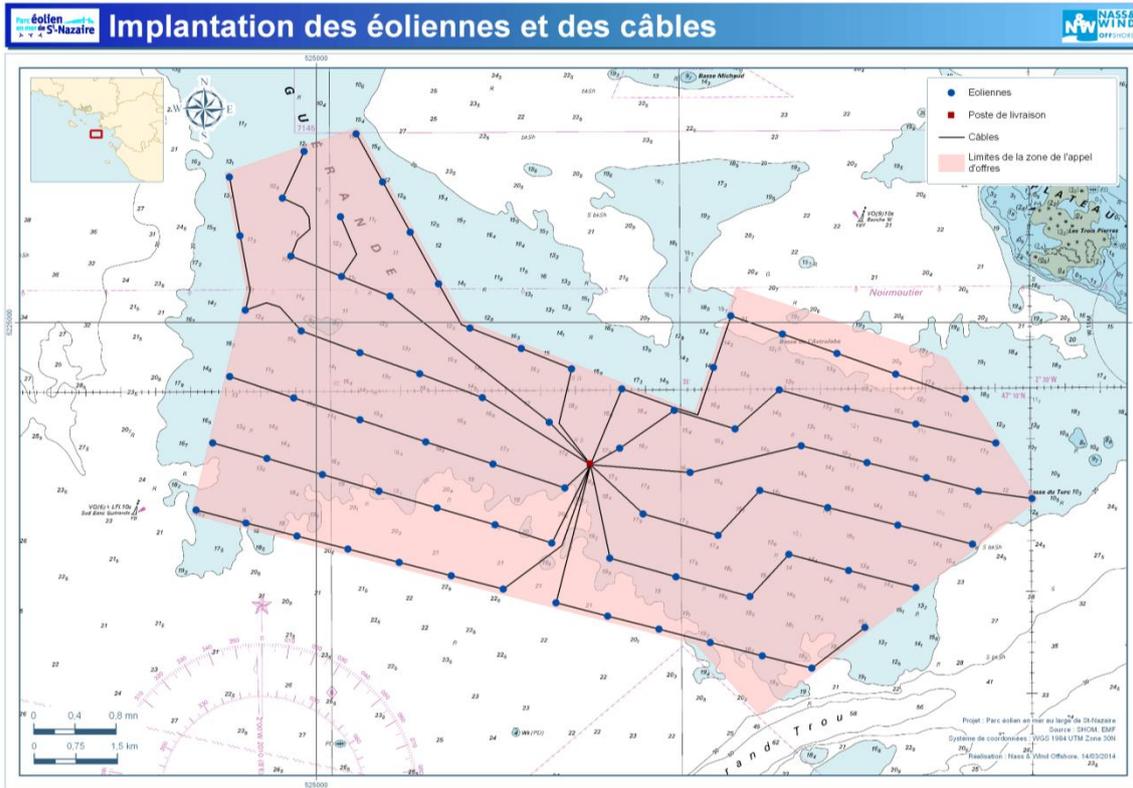


Figure 2 : Configuration du parc éolien de Saint-Nazaire

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 Saint-Nazaire 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 :

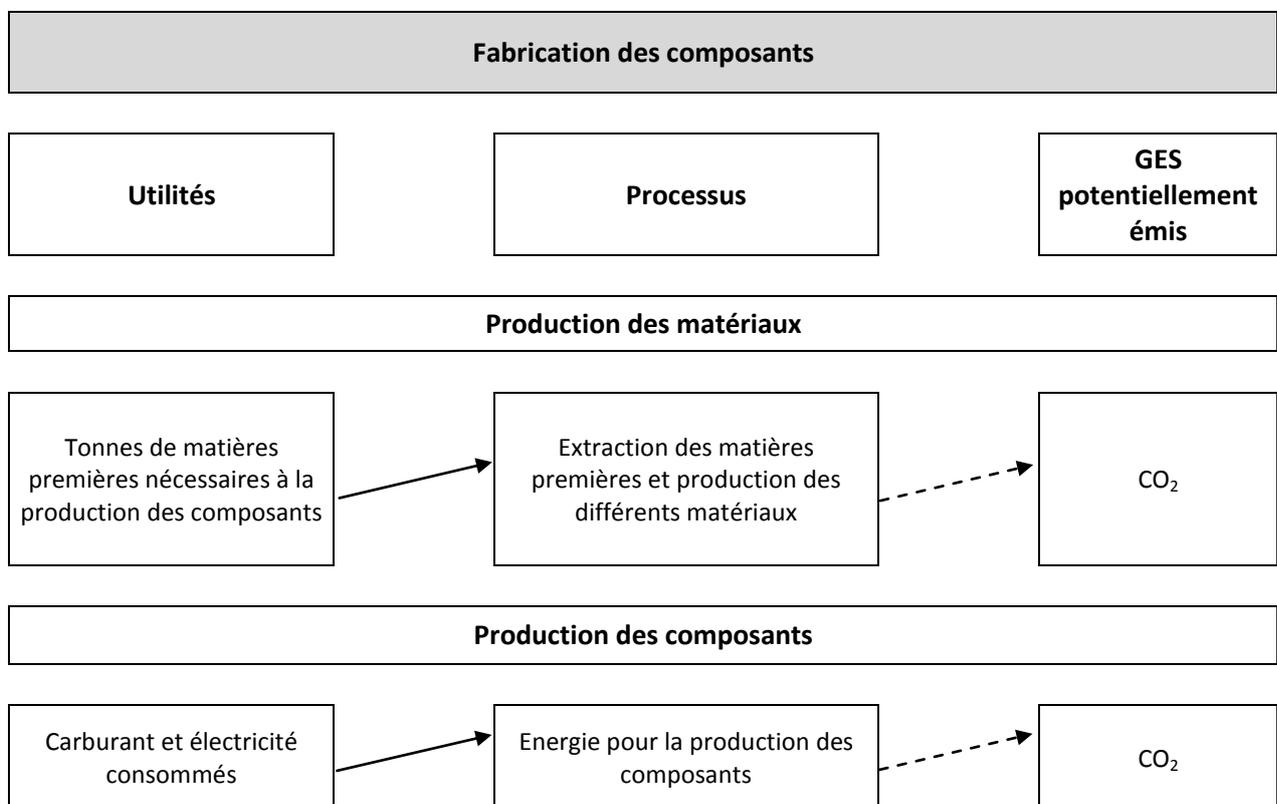


Schéma 2 : Décomposition de l'étape « Fabrication des composants »

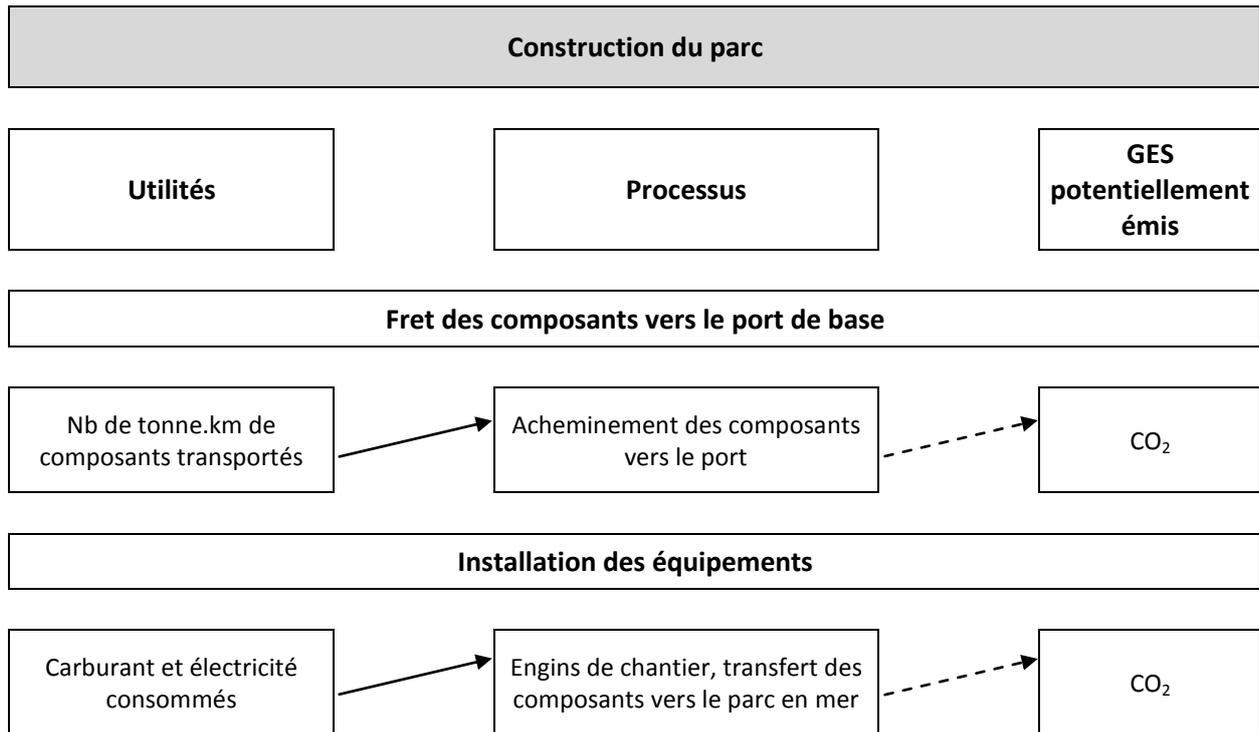


Schéma 3 : Décomposition de l'étape « Construction du parc »

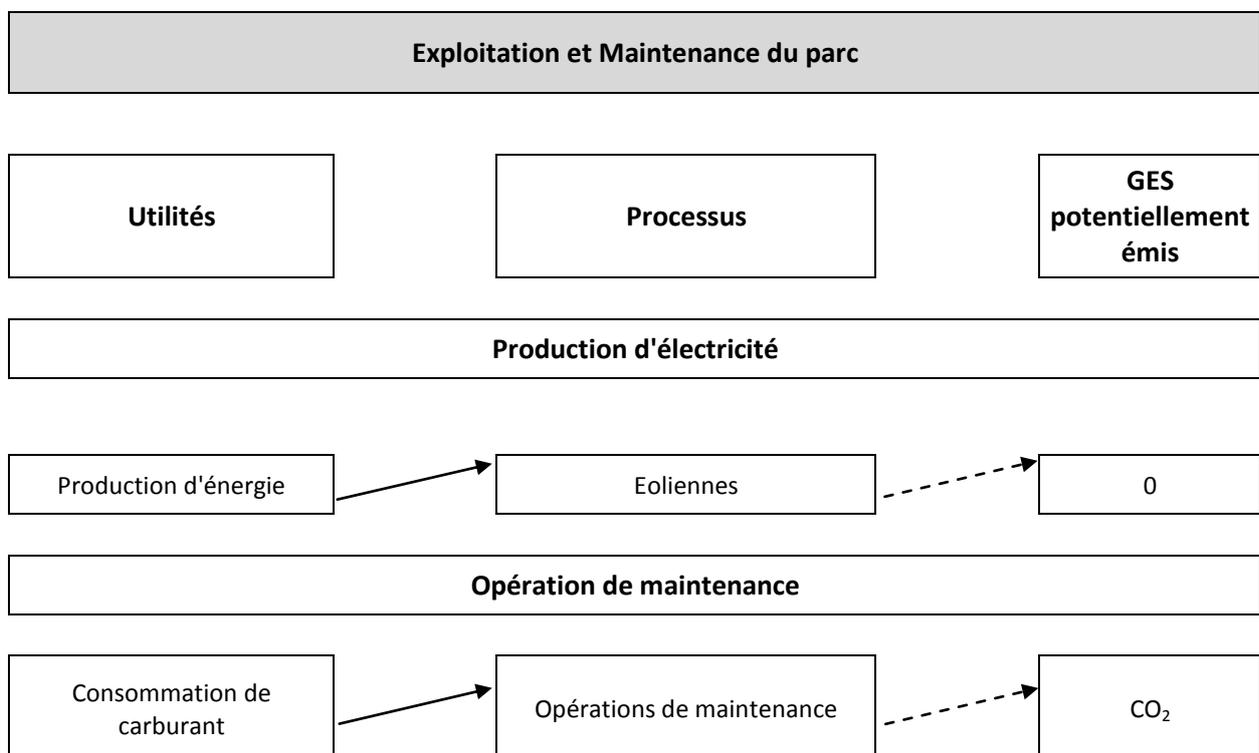


Schéma 4 : Décomposition de l'étape « Exploitation et maintenance »

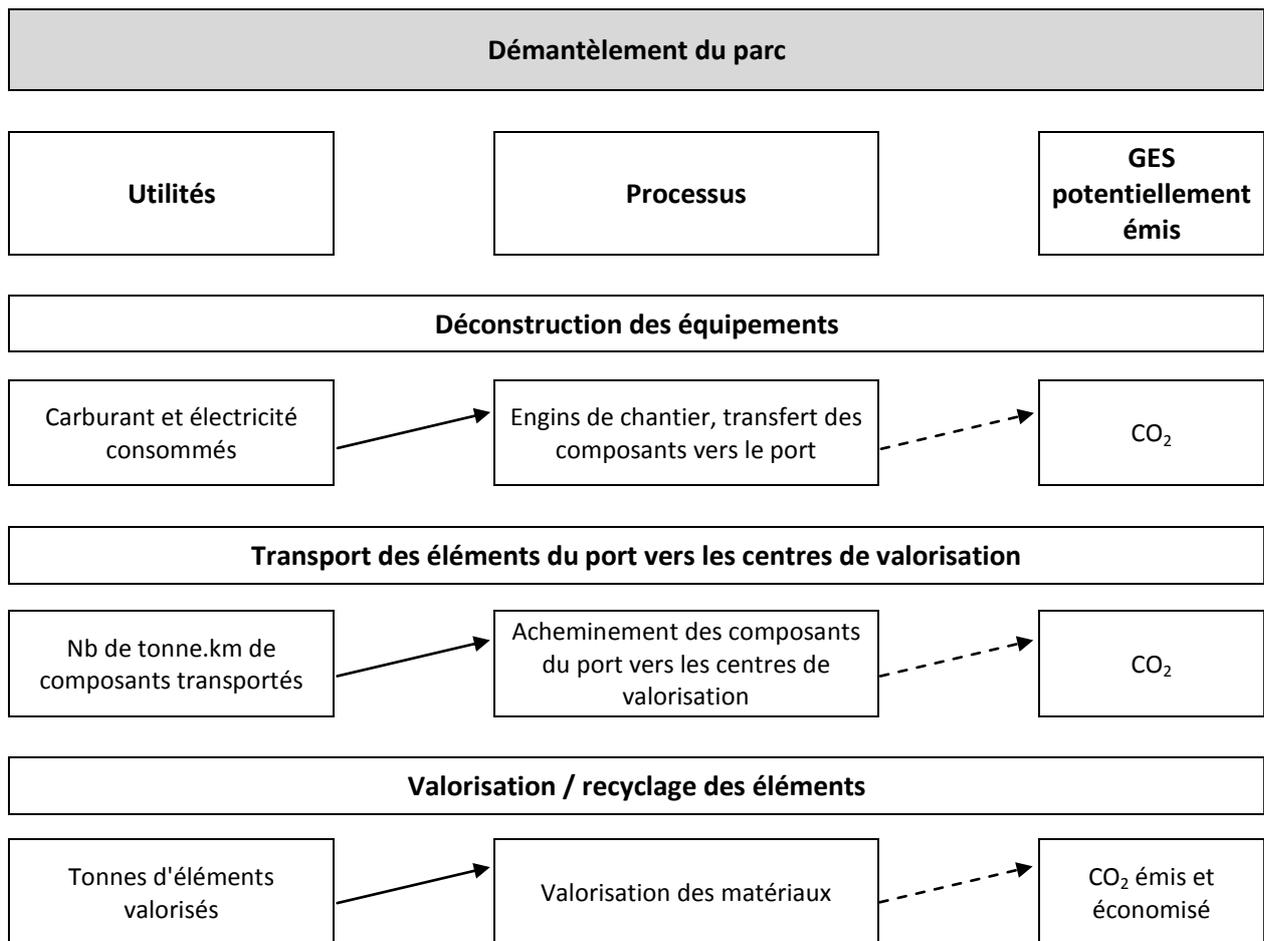


Schéma 5 : Décomposition de l'étape « Démantèlement du parc »

3.2. Les moyens utilisés

Les moyens utilisés pour réaliser le Bilan Carbone® du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire sont les suivants :

- Tableur Bilan Carbone® V7.2 ;
- Données techniques sur le parc fournies par la société de projet Parc du Banc de Guérande ;
- Données techniques sur les turbines 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 CO₂**.

4. Calcul des émissions CO₂

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 de 50 millions d'euros.

Ainsi, les émissions associées au développement du projet sont estimées à environ **5 500 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2 750 tonnes eq. CO₂.

Phase Développement	Emissions en t CO ₂ e	k€ dépensés	kg CO ₂ e par k€	Incertainitude en t CO ₂ e
Services fortement matériels	5 500	50 000	110	50%
Total	5 500			2 750

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 ensembles, eux-mêmes découpés 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, développée pour les conditions de l'éolien en mer. Le parc sera composé de 80 turbines.

Ses principales caractéristiques sont :

- Puissance unitaire : 6 MW ;
- Diamètre du rotor : 150 m ;
- Longueur des pales : 73,5 m ;
- Hauteur de la nacelle : 100 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

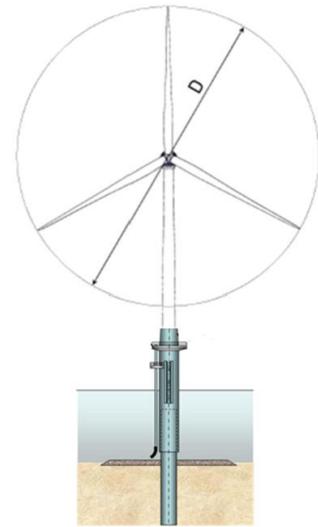


Figure 4 : Vue de face de l'éolienne Alstom Haliade 6 MW

L'éolienne est constituée d'un mât, d'une nacelle et d'un rotor comprenant 3 pales. Les éléments constituant ces composants sont détaillés ci-dessous :

Ensemble	Sous-ensemble	Matières Premières	Masse (tonne)	nombre pour le parc
Rotor	Pales	fibre de verre	28	240
Nacelle	Nacelle dont génératrice	acier	356	80
Mat	3 sections du mat	acier	399	80
	Transformateur	cuivre	10	80
	Autres équipements électroniques	acier	13	80
Peinture	Peinture	Polyuréthane et composites	2,8	80

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 m³ de peinture par éolienne a été prise. 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. Cela correspond à une masse de peinture de 2,8 t.

4.2.1.2. Production des matières premières propres aux fondations des éoliennes

Les fondations du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire sont des fondations de type monopieu. Elles se composent de deux parties : le monopieu battu et au besoin foré dans le sol et la pièce de transition qui vient coiffer le monopieu et qui supporte les structures d'accès ainsi que la plateforme de travail. La pièce de transition est cimentée au monopieu et la tour est boulonnée à la pièce de transition.

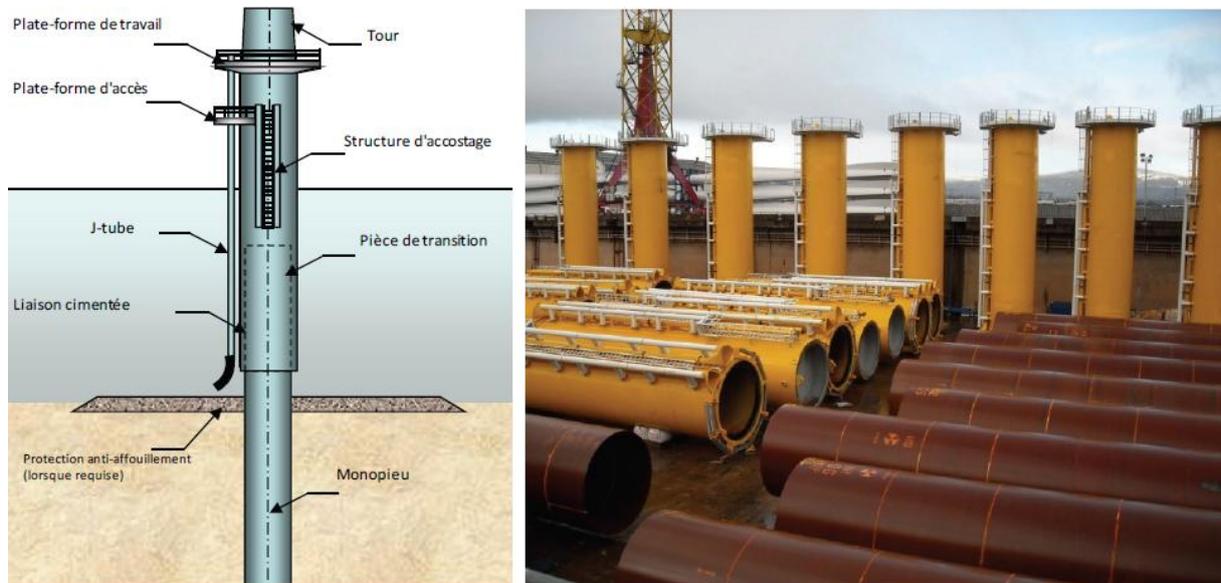


Figure 5 : Principaux éléments d'une fondation par monopieu (à gauche) et photo de monopieux et pièces de transition (à droite)

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

Ensemble	Sous-ensemble	Matières Premières	Masse unitaire (tonne)	Nombre pour le parc
Fondation	Monopieux	acier	505	80
	Pièce de transition	acier	339	80
	Structure d'accostage	acier	16	80
	Passerelle	acier	40	80
	J-tubes	acier	10	160
	Ciment	ciment	61,6	80
	Anodes sacrificielles	aluminium	11,4	80
	zinc	0,6	80	

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

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

Contrairement aux turbines, 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 secondaire², cette valeur est donc prise 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 dans 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	Jacket + Pieux	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 conservativement comme étant entièrement constitués d'aluminium, matériau ayant l'impact CO₂ le plus important.

Pour la peinture appliquée sur le poste électrique et sa fondation, la même hypothèse que pour l'éolienne de 2m³ de peinture/éolienne a été prise. Cela correspond à une masse de peinture de 2,8 t.

² Données issues du *Steel Statistical Yearbook 2013* de la *Worldsteel Association*



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 33 kV sont mis en place entre les éoliennes et le poste de transformation, des câbles dont la section fait 240 mm² et d'autres dont elle fait 630 mm². 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. Environ 4 700 t de câbles (de sections 240mm² et 630mm²) seront mis en place pour le projet de parc éolien du Banc de Guérande.

4.2.1.5. Bilan des émissions des matières premières

Les données recueillies précédemment sont ensuite utilisées dans le tableur de calcul Bilan Carbone® 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 de produits semi-finis 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 Saint-Nazaire sont estimées à environ **356 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 25 000 tonnes eq. CO₂. Le détail par famille de matériau est présenté ci-après.

Matières premières	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Métaux	335 355	94,3%	24 397	7%
Plastiques	998	0,3%	394	40%
Verre	14 280	4%	2 856	20%
Matériaux de construction	4 879	1,4%	976	20%
Total	355 512	100%	24 586	7%

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

Le détail par famille est présenté ci-dessous :

Métaux		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO2e par tonne
Eolienne	Acier	93 266	61 440	80%	1 518
	Cuivre	2 346	800	³	2 933
Poste en mer	Cuivre	2 933	1 000	³	2 933
	Acier	6 881	2 900	39,1%	2 373
Fondation	Acier	174 639	73 600	39,1%	2 373
	Aluminium	8 962	912	³	9 827
	Zinc	141	48	³	2 933
Cables	Aluminium	46 187	4 700	³	9 827
Total		335 355			

Plastiques		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	kg CO2e par tonne
Eoliennes	Composites et polyuréthane	986	224	4 400
Poste électrique en mer	Composites et polyuréthane	12	3	4 400
Total		998		

Verre		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	kg CO2e par tonne
Eolienne	Fibre de verre	14 280	6 720	2 125
Total		14 280		

Matériaux de construction - Vrac		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	kg CO2e par tonne
Fondations éoliennes	Ciment	4 879	4 928	990
Total		4 879		

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

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 offshore 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 m³ / éolienne

³ En l'absence d'information à ce stade, il a été considéré un taux de recyclage de 0%.

Les éoliennes installées sur le parc éolien au large de Saint-Nazaire ont une puissance unitaire de 6 MW. Il est donc possible proportionnellement d’obtenir l’énergie nécessaire à la fabrication des 80 éoliennes Alstom Haliade 150 :

- Consommation électrique : 74,9 TJ, soit 20 800 000 kWh ;
- Consommation fioul domestique : 49,9 tonnes ;
- Consommation gaz naturel : 1 272 800 m³, soit 12 332 886 kWh PCI.

Ces données permettent donc de déterminer les émissions de gaz à effet de serre propres à la fabrication des composants des turbines qui sont estimées à environ **4 800 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 177 tonnes eq. CO₂.

Fabrication des composants	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Combustibles	3 159	66%	128	4%
Electricité achetée	1 622	34%	122	7%
Total	4 781	100%	177	4%

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

L’installation du parc éolien au large de Saint-Nazaire se fera à partir d’un site d’assemblage sur le port de Saint-Nazaire. Les composants seront donc livrés sur ce site d’assemblage avant d’être transportés en mer vers le lieu du parc éolien au large de Saint-Nazaire dans le cadre de la construction 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 par bateau à Cherbourg.

Les émissions associées au transport des équipements entre le port d’assemblage et le site en mer au large de Saint-Nazaire sont intégrées dans l’étape d’installation des équipements et de construction du parc présentée dans la partie 4.3.2.

Fret routier

La structure d’accostage et les J-tubes sont 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 seraient 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 seront transportés par cargos entre les différents ports et le port de Saint-Nazaire.

Les émissions de gaz à effet de serre relatives au transport des différents composants vers le parc éolien en mer sont estimées à environ **7 600 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 3 600 tonnes eq. CO₂. Le détail du calcul par type de fret est présenté ci-dessous :

Fret vers port de construction	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Fret routier entrant	11	0,1%	2	19%
Fret ferroviaire entrant	125	1,6%	87	70%
Fret maritime et fluvial entrant	7 510	98,2%	3 623	48%
Total	7 646	100%	3 625	47%

Tableau 8 : Calcul des émissions de GES propres au fret des composants vers le port d'assemblage

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 au large de Saint-Nazaire a été évalué par l'équipe projet aux valeurs suivantes :

- L'équivalent de 1 166 jours de navire consommant 20 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour l'installation des turbines, des fondations et du poste en mer, dont 345 jours de stand-by ;
- L'équivalent de 152 jours de navire consommant 25 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour l'installation des câbles, dont 34 jours de stand-by ;
- L'équivalent de 2 ans et demi 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 stand-by 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 stand-by 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 Saint-Nazaire :

- 21 265 tonnes de fioul lourd pour les gros navires ;
- 21 462 m³ de fioul domestique pour les petits navires.

L'impact CO₂ de la construction du parc peut donc être estimé à environ **147 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 4 500 tonnes eq. CO₂.

Construction du parc	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Fioul domestique, France	69 622	45%	2 940	5%
Fioul lourd, France	77 356	55%	3 382	5%
Total	146 977	100%	4 481	3%

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 CO₂. 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 80 turbines pendant 25 ans entrainera la consommation d'environ 15 000 m³ de carburant.

Les opérations de maintenance du parc entraineront donc des émissions de l'ordre de **48 700 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2 000 tonnes. L'impact carbone associé à la consommation de ce carburant est présenté ci-dessous :

Exploitation et maintenance	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Combustible	48 659	100%	2 055	4%
Total	48 659	100%	2 055	4%

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, tous les éléments sont retirés (éoliennes, poste électrique en mer, câbles sous-marins, fondations coupées au niveau du fond marin, etc.) pour être recyclés et valorisés dans la mesure du possible. Seules les fondations sont découpées au niveau du fond marin.

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.).

De la même manière que pour la phase construction, une consommation résiduelle de carburant de 5 tonnes de MGO / jour est considérée pour les journées stand-by des gros navires.

Ces données permettent d'estimer la consommation de carburant propre à la déconstruction du parc éolien au large de Saint-Nazaire :

- 21 265 tonnes de fioul lourd pour les gros navires
- 21 462 m³ de fioul domestique pour les petits navires

L'impact CO₂ de la déconstruction du parc peut donc être estimé à environ **147 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 4 500 tonnes eq. CO₂.

Déconstruction du parc	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Fioul domestique, France	69 622	45%	2 940	5%
Fioul lourd, France	77 356	55%	3 341	5%
Total	146 977	100%	4 481	3%

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	61 440	régional et régions limitrophes	250
Acier issu à 39,1% du recyclage	60 340	régional et régions limitrophes	250
Fibre de verre	6 720	régional	50
Cuivre	1 800	régional	50
Aluminium	4 837	régional	50
Zinc	7	régional	50

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

L'acier dont le volume à recycler est important, sera évacué vers différents centres de valorisation situés dans la région de Saint-Nazaire et dans les régions limitrophes. Ainsi, une distance de 250 km est retenue pour le transport de l'acier vers les centres de valorisation. L'acier sera transporté en camion benne.

Pour les autres matériaux, les centres de valorisation seront majoritairement situés dans la région de Saint-Nazaire. 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 également transportés en camion bennes.

L'impact du transport de ces matériaux en fin de vie est de l'ordre de **3 600 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2 000 tonnes eq. CO₂. Le détail du calcul est indiqué ci-dessous :

Fret vers centres de valorisation des matériaux	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Fret routier sortant	3 642	100%	1 944	53%
Total	3 642	100%	1 944	53%

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. L'impact carbone de cette étape est de l'ordre de **4 5 00 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 1 400 tonnes eq. CO₂, comme indiqué ci-dessous :

Traitement des matériaux en fin de vie	Emissions		Incertitudes	
	t CO ₂ e	%	t CO ₂ e	%
Métaux	4 238	95%	1 423	34%
Verre	222	5%	111	50%
Total	4 460	100%	1 428	32%

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

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

Métaux	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO ₂ e émis par tonne	Emissions en t CO ₂ e	kg CO ₂ e évité par tonne	Emissions évitées en t CO ₂ e
Acier	61 440	80%	33	2 028	- 167	- 10 273
Acier	60 340	39,1%	33	1 991	- 509	- 30 721
Aluminium	4 837		33	160	- 3 726	- 18 020
Cuivre	1 800		33	59	0	0
Zinc	7			0,2	0	
Total				4 238	0	- 59 013

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 **59 000 tonnes eq. CO₂** comme indiqué ci-dessous.

Economies revendiquées (valorisation)	t CO ₂ e
Emissions évitées métaux	- 59 013
Total	- 59 013

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 Saint-Nazaire sont estimées à **724 000 tonnes eq. CO₂** pour l'ensemble de son cycle de vie, avec une incertitude de 26 000 tonnes eq. CO₂.

Le détail par étape est indiqué ci-dessous :

Bilan des émissions de gaz à effet de serre	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	Relatives	t CO2e	%
Phase développement	5 500	1%	2 750	50%
Matières premières	355 512	49%	24 586	7%
Fabrication des composants	4 781	1%	177	4%
Construction du parc	146 977	20%	4 481	3%
Exploitation et Maintenance	48 659	7%	2 055	4%
Déconstruction du parc	146 977	20%	4 481	3%
Fret	11 288	2%	4 113	36%
Fin de vie	4 460	1%	1 428	3%
Total	724 155	100%	25 988	4%

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

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

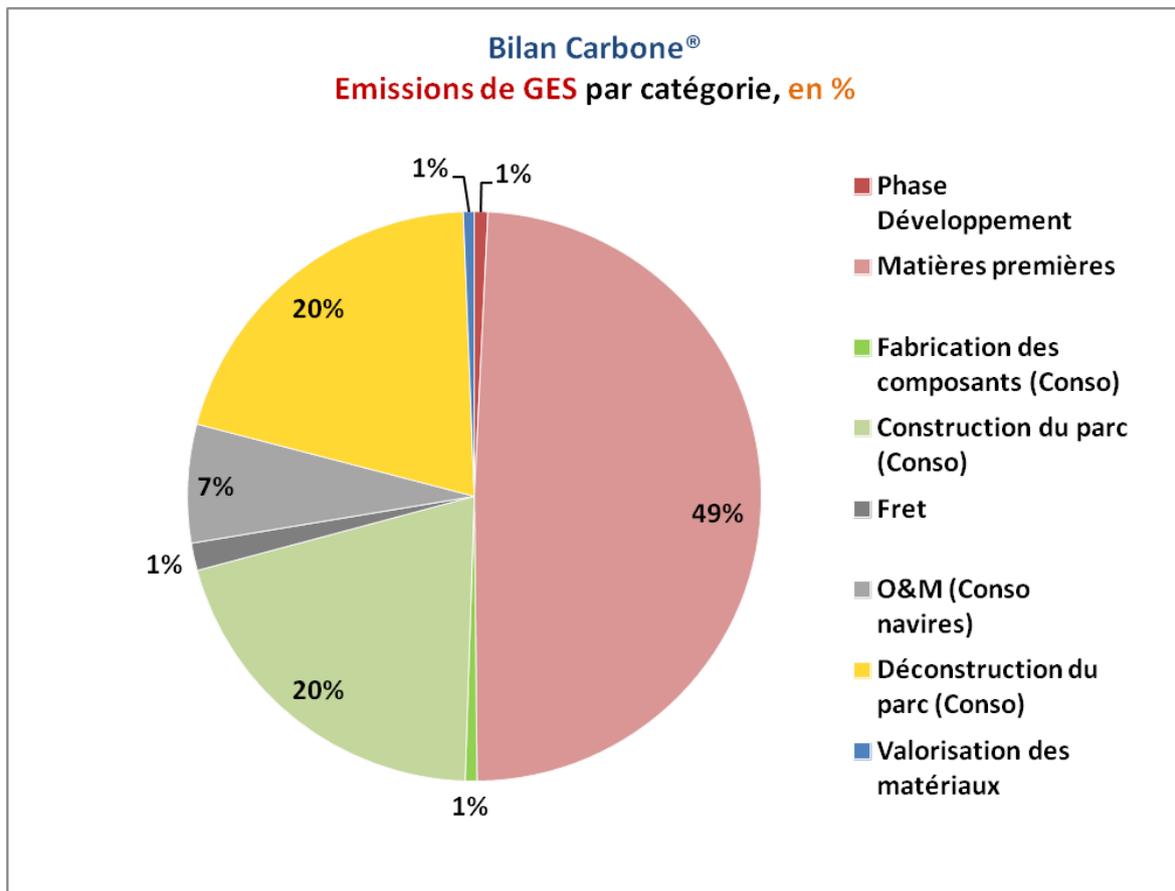


Figure 7 : Répartition des émissions de GES en équivalent CO₂ par catégorie

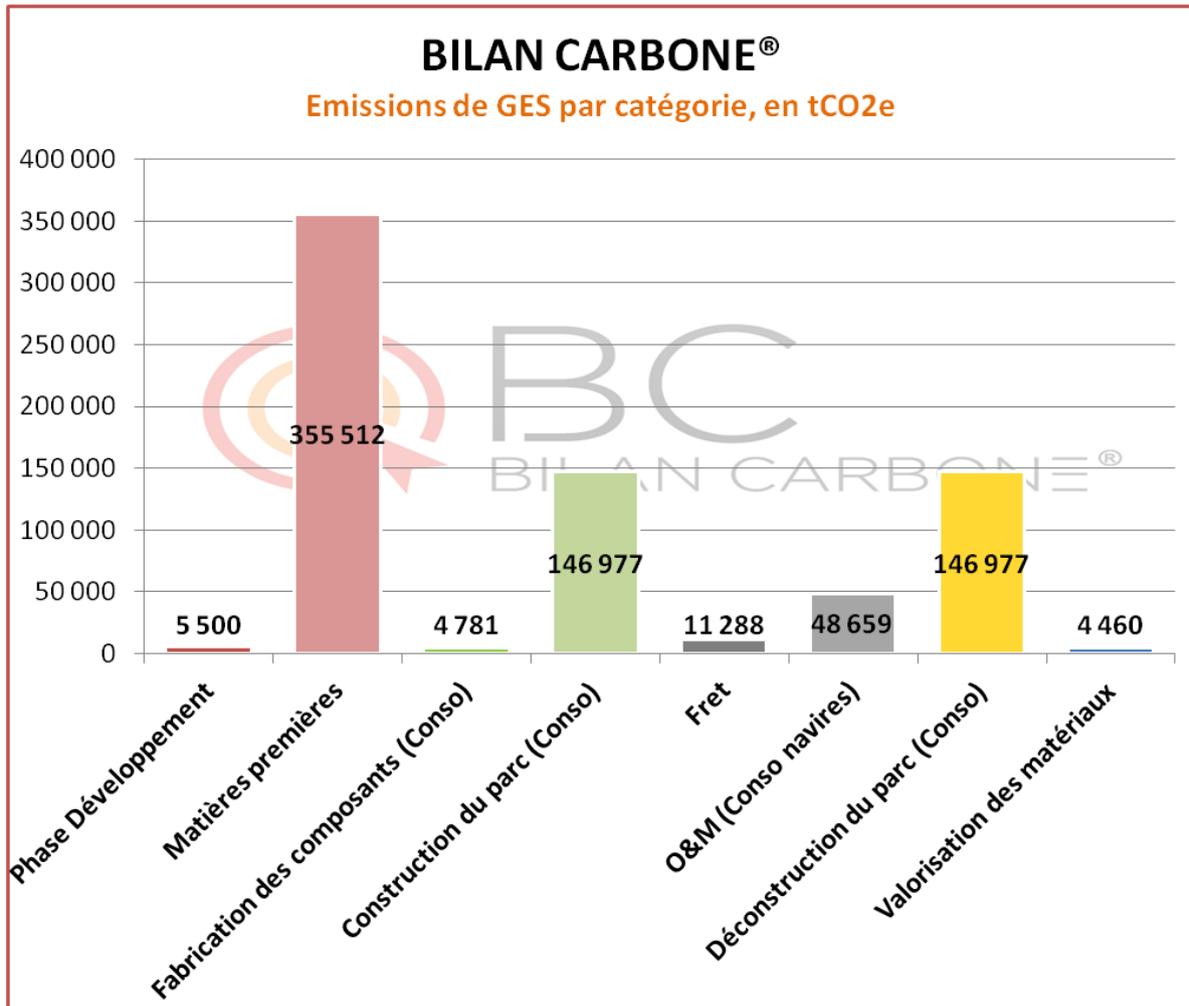


Figure 8 : Emissions de GES en tonnes équivalent CO₂ par catégorie

En conclusion les émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire sont estimées à **724 000 tonnes eq. CO₂** pour l'ensemble de la durée de vie du parc avec une incertitude de 26 000 tonnes eq. CO₂.

La valorisation des métaux en fin de vie permet d'éviter **59 000 tonnes eq. CO₂** 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 80 turbines, la production d'électricité attendue pour les 25 années d'exploitation du parc est estimée à **43 375 GWh**.

Les émissions de GES ramenées au kWh produit sont donc de l'ordre de
18,5 g eq. CO₂ / kWh produit
+/- 0,6 g eq. CO₂ / 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 CO₂ associées à la production d'électricité dans différents pays. Ces valeurs moyennes sont présentées ci-dessous :

Type de production d'électricité	Emissions CO ₂ en g eq. CO ₂ / kWh produit
France - moyenne	72
Union Européenne - moyenne	306
Parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire	19
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. CO₂ des différents types de production d'électricité

Annexe : Attestations de formation



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



Institut de
Formation
Carbone

ATTESTATION DE FORMATION

Je soussigné, François KORNMAN, 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