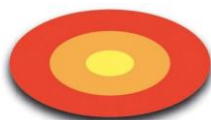




Bilan Carbone®

du parc éolien en mer au large de

Saint-Nazaire



BILAN CARBONE®
Utilisateur 2013

Février 2013

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 | 4 |
| 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..... | 17 |
| 4.3.1. Transport des composants jusqu'au port..... | 17 |
| 4.3.2. Energie pour le levage et la construction du parc..... | 18 |
| 4.4. Exploitation et maintenance du parc | 19 |
| 4.4.1. Production d'électricité | 19 |
| 4.4.2. Opérations de maintenance | 19 |
| 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..... | 21 |
| 5. Bilan..... | 23 |

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 de la centrale éolienne 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 7,3 g eq. CO₂ / kWh pour les émissions d'un parc éolien sur terre en prenant en compte un facteur de charge moyen français.

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, employée d'EDF EN France, qui a suivi en novembre 2009 la formation de l'ADEME « Bilan Carbone® Module 1 : Acquisition des bases de la Méthode » permettant de réaliser en interne des bilans carbone bénéficiant du label « Bilan Carbone® » (certificat de formation en annexe).

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 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, station 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 internationaux :

- 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®.

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'information sont donc à prendre en compte. Toutefois, une imprécision due à la non exhaustivité des données ne fera pas obstacle à la finalité principale de la méthode Bilan Carbone®, qui est de mettre en place des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour enclencher puis évaluer l'action, une hiérarchie des émissions et des ordres de grandeur de ces dernières ainsi qu'une évaluation à 20% près suffisent. La réduction des émissions de GES est donc l'objectif final recherché.
- 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 seront développés dans l'étude d'impact qui sera réalisée en 2013 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.

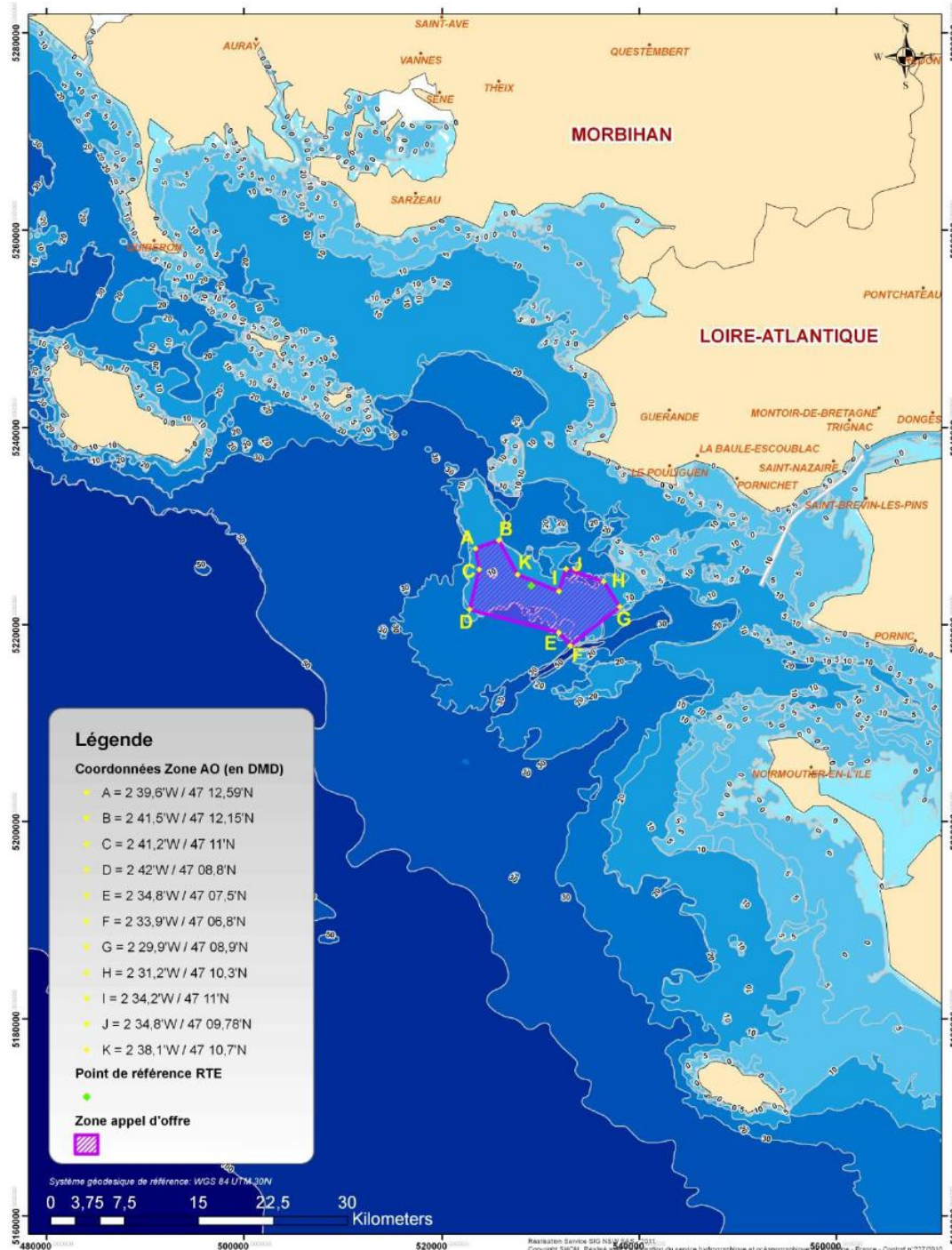


Figure 1 : Implantation du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire

Le Maître d'Ouvrage sélectionné par appel d'offres pour construire et exploiter ce parc éolien propose la mise en place de 80 éoliennes Alstom Haliade de puissance unitaire 6MW pour une

capacité totale du parc de 480MW. Ce parc permettra d'alimenter en électricité l'équivalent de 720 000 habitants, chauffage inclus.

La superficie du parc en mer sera de 78 km² pour l'implantation des 80 éoliennes. La mise en service du parc est prévue à partir de 2018 et son exploitation devrait durer 25 ans.

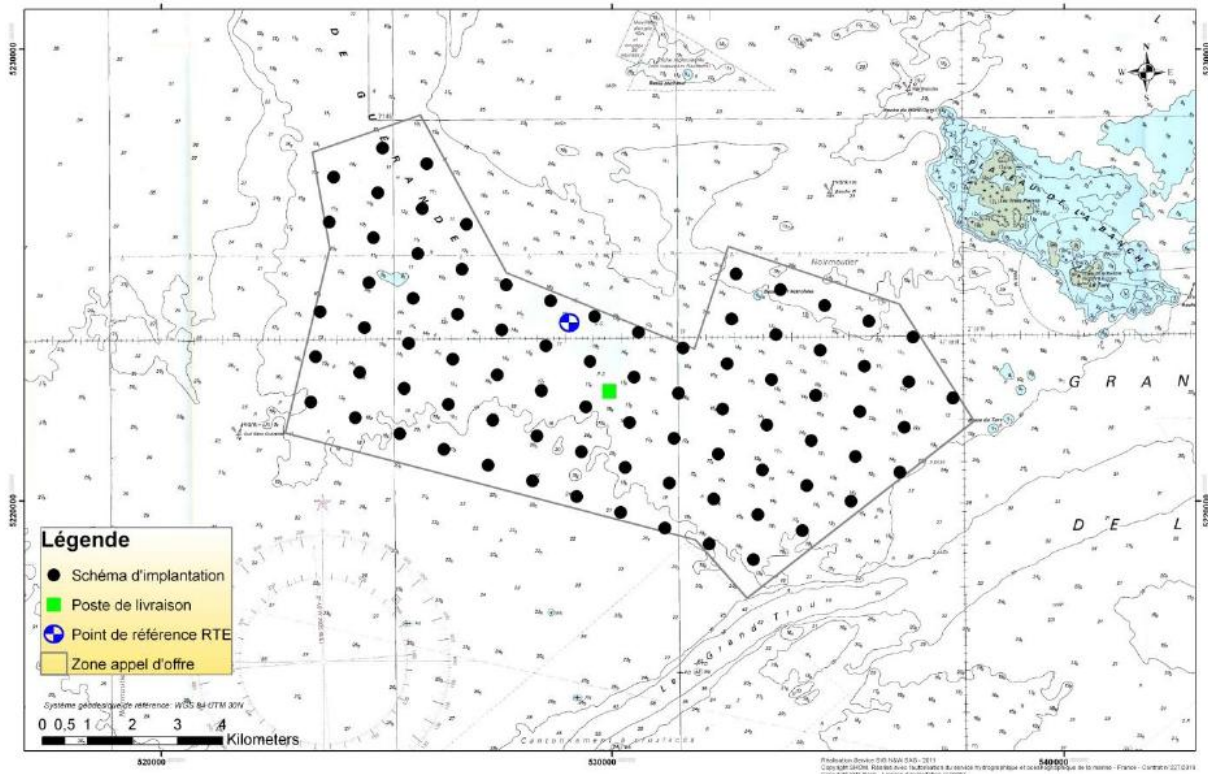


Figure 2 : Plan d'implantation des éoliennes et du poste de livraison

Le port de base pour l'installation du parc sera le port de Saint-Nazaire ou de Brest, celui pour la maintenance du parc sera le port de La Turballe.

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 :

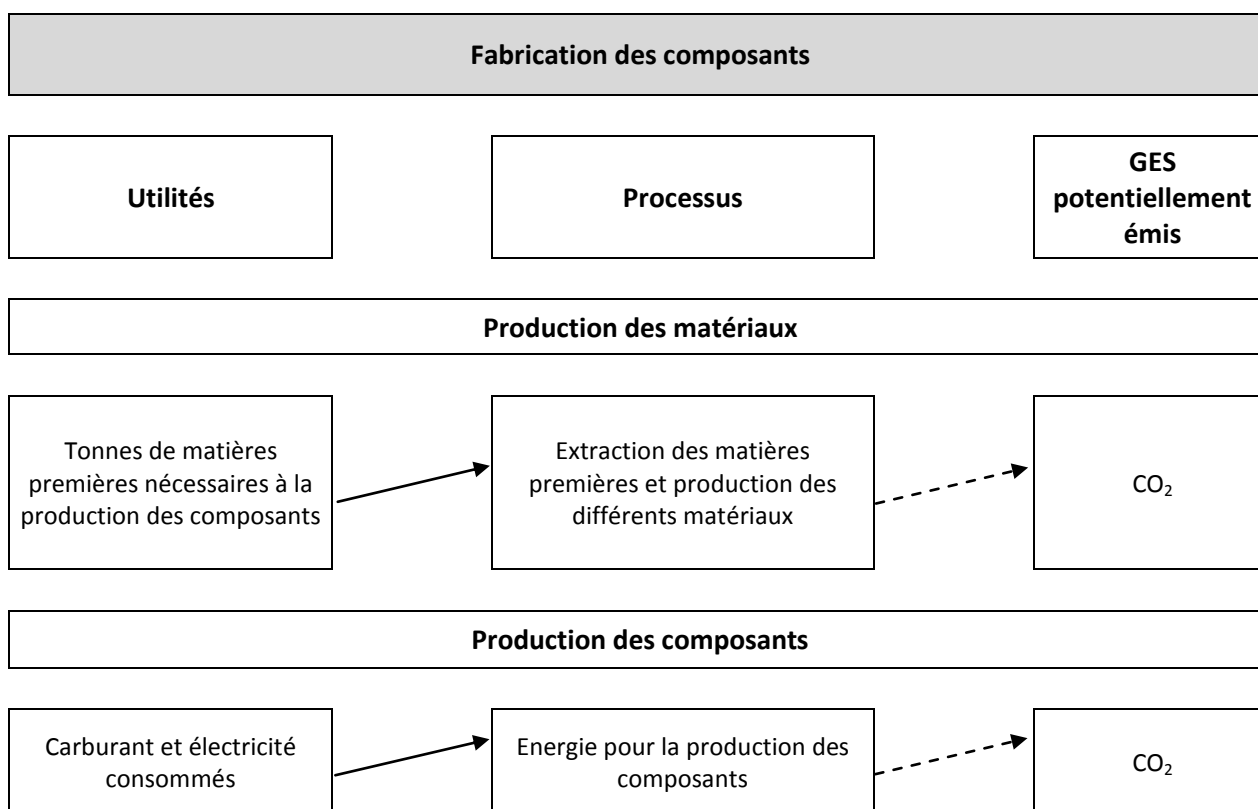


Schéma 2 : Décomposition de l'étape « fabrication des composants »

Le transport des matériaux et produits semi-finis de leur lieu de production vers les usines de fabrication des différents composants n'est pas pris en compte dans le présent Bilan Carbone®, les données sur ces paramètres n'étant pas connues.

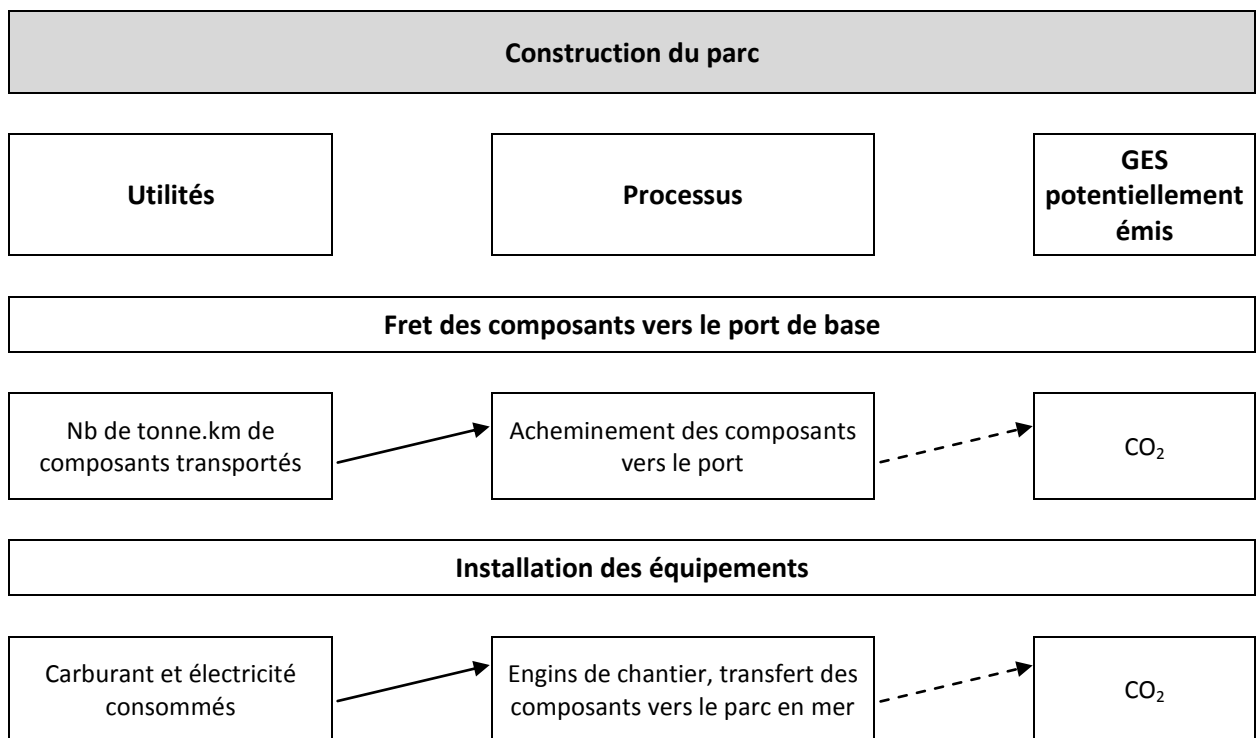


Schéma 3 : Décomposition de l'étape « construction du parc »

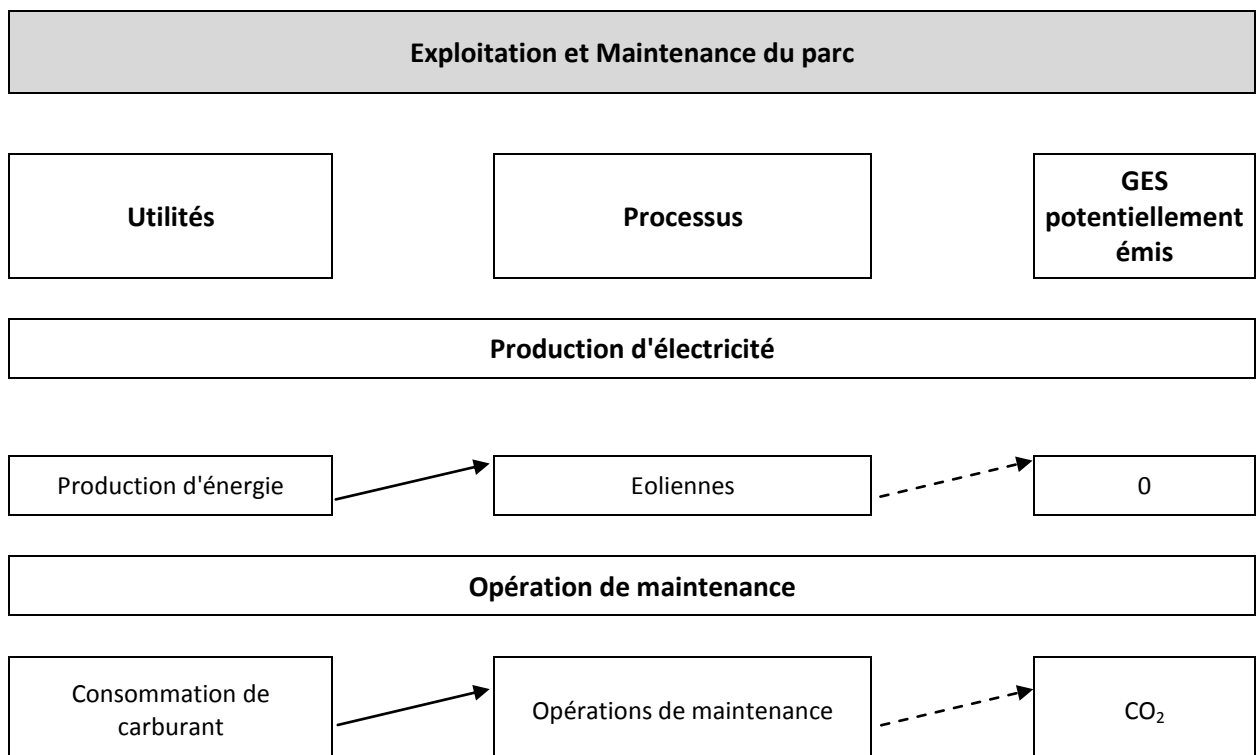


Schéma 4 : Décomposition de l'étape « exploitation et maintenance »

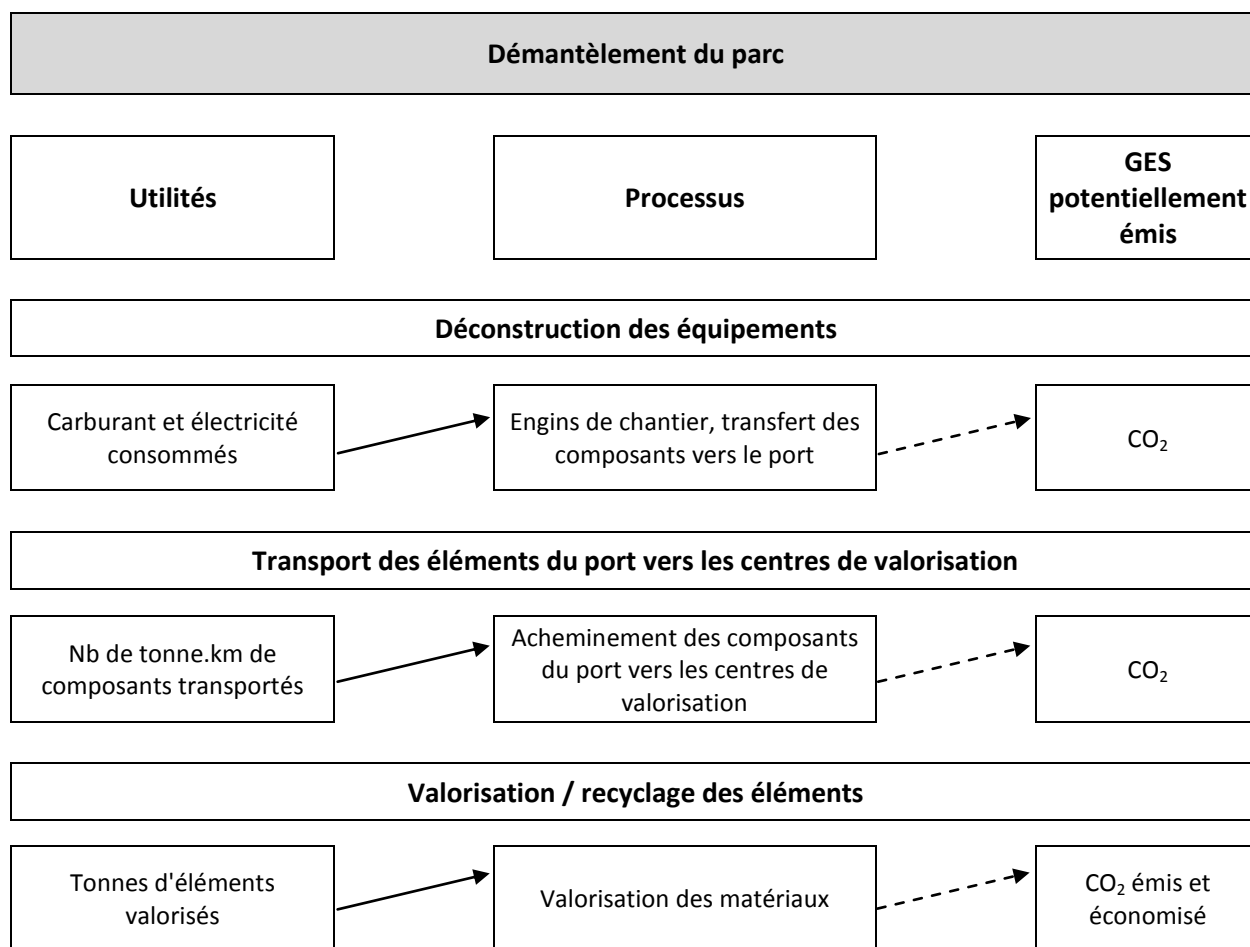


Schéma 5 : Décomposition de l'étape « démantèlement du parc »

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 :

- Tableau Bilan Carbone® V7.1.03
- Données techniques sur le parc fournies par l'équipe projet EDF EN France et Dong Energy
- Données techniques sur les turbines fournies par Alstom

Les facteurs d'émission sont issus de la base ADEME de la méthode Bilan Carbone®. 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 et la réalisation d'études complexes 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 logiciel 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 50 000 000 €.

Ainsi, les émissions associées au développement du projet sont estimées à **5 500 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2750 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 matérialisés | 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 composants sont décomposés en sous-composants qui les constituent. **Les sous-composants dont la masse unitaire était inférieure à 5 tonnes n'ont pas été pris en compte dans le calcul du Bilan Carbone®.**

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

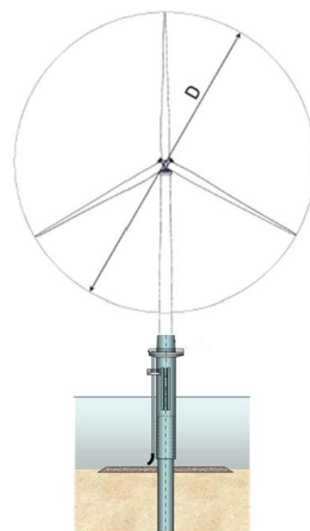


Figure 4 : Vue de face de l'éolienne Alstom Haliade 6MW

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

| Composant | Sous composant | Matières Premières | Masse (tonne) | nombre pour le parc |
|----------------|----------------------------------|--------------------|---------------|---------------------|
| Rotor | Pales | fibres de verre | 32,5 | 240 |
| Nacelle | Nacelle dont génératrice | acier | 360 | 80 |
| Mat | 3 sections du mat | acier | 377 | 80 |
| | Transformateur | cuivre | 10 | 80 |
| | Autres équipements électroniques | acier | 13 | 80 |

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

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®.

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.

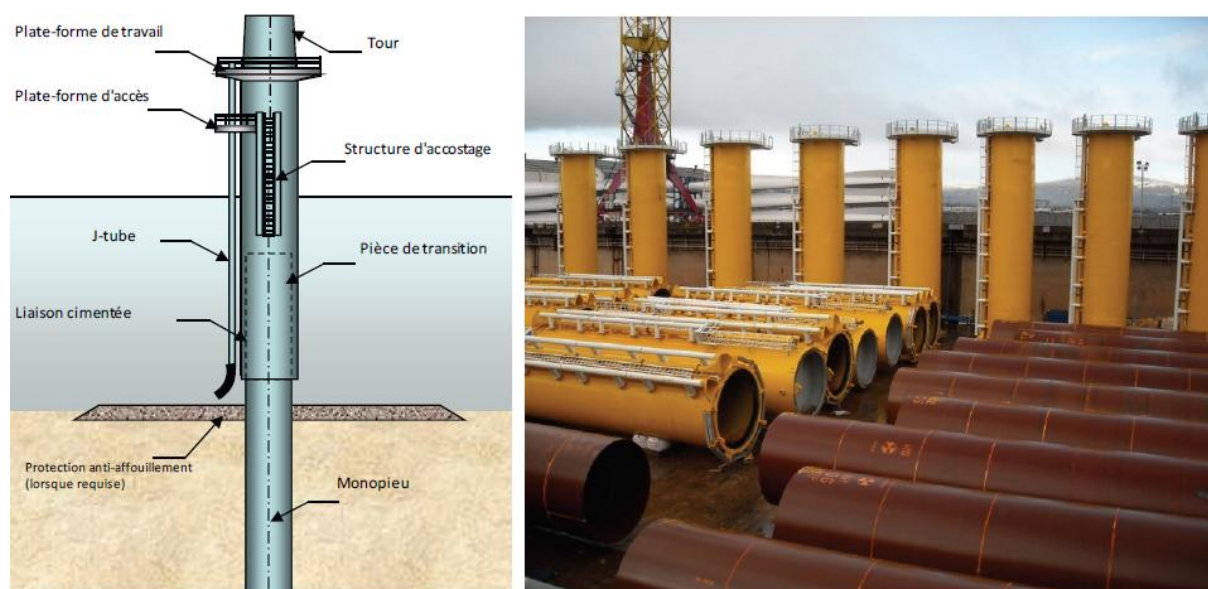


Figure 5 : Principaux éléments d'une fondation par monopieu (à gauche) et photo de monopieux et pièces de transition (à droite)

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

| Composant | Sous composant | Matières Premières | Poids unitaire (tonne) | Nombre pour le parc |
|-----------|-----------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Fondation | Monopieux | acier | 648 | 80 |
| | Pièce de transition | acier | 505 | 80 |
| | Structure d'accostage | acier | 16 | 80 |
| | Passerelle | acier | 40 | 80 |
| | J-tubes | acier | 10 | 162 |
| | Ciment | ciment | 61,6 | 80 |

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

Le tonnage des différents composants des fondations présenté ci-dessus est basé sur les fondations qui seront mises en place au niveau des zones les plus profondes de la mer. Elles correspondent donc aux fondations contenant le plus de matériaux. Cette approche est donc conservatrice par rapport au cas réel dans lequel la plupart des fondations en place contiendront une quantité moindre de matériaux.

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 36,3% composé d'acier secondaire¹, cette valeur est donc prise en compte dans le calcul du bilan carbone®.

¹ Données issues du *Steel Statistical Yearbook 2011* de la Worldsteel Association

4.2.1.3. Production des matières premières propres au poste en mer

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

| Composant | Sous composant | Matières Premières | Poids unitaire (tonne) | Nombre pour le parc |
|--------------------------------|---|-------------------------|------------------------|---------------------|
| Poste de transformation en mer | Structure | acier | 965 | 1 |
| | Transformateur 33/225 kV et cellules 33 et 225 kV | acier, cuivre | 435 | 2 |
| | Câbles | cuivre, PEHD, aluminium | 17 | 1 |
| Fondation pour le poste en mer | Jacket | acier | 965 | 1 |
| | Pieux | acier | 65 | 4 |
| | Ciment | pondéreux | 17,6 | 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 36,3% 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 CO₂ le plus important.



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 240mm² et d'autres dont elle fait 630mm². Les câbles sont constitués d'aluminium, de cuivre et de PEHD. Comme la part relative de ces matériaux n'est pas connue, les câbles sont considérés comme étant entièrement constitués d'aluminium, matériau ayant l'impact CO₂ le plus important. Les quantités de câbles mises en place sur le projet de parc éolien au large de Saint-Nazaire sont indiquées ci-dessous :

- Câbles section 240mm² : 1500 tonnes
- Câbles section 630mm² : 1800 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® 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 **394 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 50 000 tonnes eq. CO₂. Le détail par famille de matériau est présenté ci-dessous.

| Matières premières | Emissions | | Incertitudes | |
|---------------------------|----------------|-------------|---------------|------------|
| | t CO2e | % | t CO2e | % |
| Métaux | 372 984 | 95% | 45 777 | 12% |
| Verre | 16 575 | 4% | 3 315 | 20% |
| Matériaux de construction | 4 896 | 1% | 979 | 20% |
| Total | 394 455 | 100% | 50 071 | 13% |

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 | 91 080 | 60 000 | 80% | 1 518 |
| | Cuivre | 2 346 | 800 | | 2 933 |
| Poste en mer | Aluminium | 167 | 17 | | 9 827 |
| | Cuivre | 2 552 | 870 | | 2 933 |
| | Acier | 5 312 | 2 185 | 36,3% | 2 431 |
| Fondation | Acier | 239 097 | 98 340 | 36,3% | 2 431 |
| Cables | Aluminium | 32 429 | 3 300 | | 9 827 |
| Total | | 372 984 | | | |

| Verre | | Emissions t CO2e | Tonnes utilisées | % issu du recyclé | kg CO2e par tonne |
|--------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Eolienne | Fibre de verre | 16 575 | 7 800 | | 2 125 |
| Total | | 16 575 | | | |

| Matériaux de construction - Vrac | | Emissions t CO2e | Tonnes utilisées | kg CO2e par tonne |
|----------------------------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Fondations éoliennes | Ciment | 4 879 | 4 928 | 990 |
| Fondation poste en mer | Ciment | 17 | 18 | 990 |
| Total | | 4 896 | | |

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

4.2.2. Production des composants

Aucune donnée du constructeur des turbines Alstom n'est pour le moment disponible sur cette étape de fabrication des composants des éoliennes. 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 faites pour la construction des composants d'une éolienne offshore de puissance unitaire 2,5MW ayant un mat acier tubulaire :

- Consommation électrique : 0,39 TJ / éolienne
- Consommation fioul domestique : 260 kg / éolienne
- Consommation gaz naturel : 6629 m³ / éolienne

Les turbines installées sur le parc éolien au large de Saint-Nazaire ont une puissance unitaire de 6MW. Il est donc possible proportionnellement d'obtenir l'énergie nécessaire à la fabrication des 80 turbines 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 **4 700 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 350 tonnes eq. CO₂.

| Fabrication des composants | Emissions | | Incertitudes | |
|----------------------------|--------------|-------------|--------------|-----------|
| | t CO2e | % | t CO2e | % |
| Combustibles | 3 079 | 65% | 154 | 5% |
| Electricité achetée | 1 622 | 35% | 195 | 12% |
| Total | 4 701 | 100% | 349 | 7% |

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 ou de Brest, le lieu n'est pas encore défini. 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 mats sont produits à Cherbourg, la nacelle et le poste en mer sont assemblés à Saint-Nazaire. Pour les fondations des éoliennes, leur lieu de fabrication n'est pas encore définitivement choisi. Pour le calcul de cette étape relative aux émissions associées au transport des différents composants vers les ports d'installation du parc, il a donc été considéré une hypothèse conservatrice, à savoir que le site d'assemblage se situera à Brest et que les fondations des éoliennes seront fabriquées près de 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 puisque leur poids unitaire est inférieur à 25 tonnes.

Les passerelles de fondation seront transportées sur des faibles distances par des ensembles articulés en raison de leur poids unitaire inférieur à 40 tonnes et les cellules seront 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 dense.

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.

Les émissions de gaz à effet de serre relatives au transport des différents composants vers le parc éolien en mer sont estimées à **10 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 6 000 tonnes eq. CO₂. Le détail du calcul par type de fret est présenté ci-dessous :

| Fret vers port de construction | Emissions | | Incertitudes | |
|----------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|------------|
| | t CO ₂ e | % | t CO ₂ e | % |
| Fret routier entrant | 16 | 1% | 7 | 46% |
| Fret ferroviaire entrant | 124 | 3% | 87 | 70% |
| Fret maritime et fluvial entrant | 9 903 | 96% | 6 003 | 61% |
| Total | 10 042 | 100% | 6 097 | 61% |

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 1166 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 standby.
- 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 standby.
- 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 standby 30% du temps.

Le standby 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 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 **147 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 7 400 tonnes eq. CO₂.

| Construction du parc | Emissions | | Incertitudes | |
|--------------------------|----------------|-------------|--------------|-----------|
| | t CO2e | % | t CO2e | % |
| Fioul domestique, France | 69 622 | 45% | 3 481 | 5% |
| Fioul lourd, France | 77 356 | 55% | 3 868 | 5% |
| Total | 146 977 | 100% | 7 349 | 5% |

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 7500L. Ainsi l'exploitation des 80 turbines pendant 25 ans entrainera la consommation de 15 000 m³ de carburant.

Les opérations de maintenance du parc entraîneront donc des émissions de **48 700 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2 400 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% | 2 433 | 5% |
| Total | 48 659 | 100% | 2 433 | 5% |

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, seule une partie de la fondation est laissée en place : la moitié du monopieu qui est implantée dans le sous-sol. Tout ce qui dépasse du sol est retiré pour être recyclé et valorisé si possible : la moitié hors-sol du monopieu, les câbles sous marin, la pièce de transition, l'ensemble des turbines, le poste en mer et sa fondation.

4.5.1. Energie nécessaire pour la déconstruction des équipements du parc

De la même manière que pour la construction, les temps de déconstruction sont considérés identiques pour l'enlèvement des câbles, des turbines et du poste en mer. Pour les fondations, comme une partie des monopieux reste en mer, le temps de déconstruction associé est réduit d'un quart par rapport à celui de la construction. Les temps d'utilisation des navires pour la phase de déconstruction sont donc les suivants :

- L'équivalent de 941 jours de navire consommant 20 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour la déconstruction des turbines, des fondations et du poste en mer, dont 279 jours de standby.
- L'équivalent de 152 jours de navire consommant 25 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour le retrait des câbles, dont 34 jours de standby.
- L'équivalent de 2 ans et demi de 7 petits navires consommant 200L/h/navire de Marine Diesel Oil (MDO) pour l'enlèvement des installations diverses, ces navires étant en standby 30% du temps.

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 standby des gros navires.

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

- 17 755 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 **134 000 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 6 700 tonnes eq. CO₂.

| Déconstruction du parc | Emissions | | Incertitudes | |
|--------------------------|----------------|-------------|--------------|-----------|
| | t CO2e | % | t CO2e | % |
| Fioul domestique, France | 69 622 | 52% | 3 481 | 5% |
| Fioul lourd, France | 64 588 | 48% | 3 229 | 5% |
| Total | 134 209 | 100% | 6 710 | 5% |

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 valoriser sont présentés ci-dessous :

| Matériau | poids à valoriser (tonnes) | lieu centre valorisation | km route |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------|
| Acier issu à 80% du recyclage | 60 000 | régional et régions limitrophes | 250 |
| Acier issu à 36,3% du recyclage | 74 605 | régional et régions limitrophes | 250 |
| Fibre de verre | 7 800 | régional | 50 |
| Cuivre | 1 670 | régional | 50 |
| Aluminium | 3 317 | 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 250km 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 50km. Les matériaux à valoriser seront également transportés en camion bennes.

L'impact du transport de ces matériaux en fin de vie est de **4 500 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 3 100 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 | 4 507 | 100% | 3 155 | 70% |
| Total | 4 507 | 100% | 3 155 | 70% |

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 **4 900 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2 400 tonnes eq. CO₂, comme indiqué ci-dessous :

| Traitement des matériaux en fin de vie | Emissions | | Incertitudes | |
|--|--------------|-------------|--------------|------------|
| | t CO2e | % | t CO2e | % |
| Métaux | 4 607 | 95% | 2 303 | 50% |
| Verre | 257 | 5% | 129 | 50% |
| Total | 4 864 | 100% | 2 432 | 50% |

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 CO2e émis par tonne | Emissions en t CO2e | kg CO2e évité par tonne | Emissions évitées en t CO2e |
|--------------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Acier | 60 000 | 80% | 33 | 1 980 | - 167 | - 10 032 |
| Acier | 74 605 | 36,3% | 33 | 2 462 | - 533 | - 39 730 |
| Aluminium | 3 317 | | 33 | 109 | - 3 726 | - 12 358 |
| Cuivre | 1 670 | | 33 | 55 | 0 | 0 |
| Total | | | | 4 607 | | - 62 119 |

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 **62 000 tonnes eq. CO₂** comme indiqué ci-dessous.

| Economies revendiquées (valorisation) | t CO2e |
|---------------------------------------|-----------------|
| Emissions évitées métaux | - 62 119 |
| Total | - 62 119 |

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 **754 000 tonnes eq. CO₂** pour l'ensemble de son cycle de vie, avec une incertitude de 81 000 tonnes eq. CO₂, sachant qu'une économie de plus de **62 000 tonnes eq. CO₂** peut être prise en compte grâce à la valorisation des métaux en fin de vie.

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 | 394 455 | 52% | 50 071 | 13% |
| Fabrication des composants | 4 701 | 1% | 349 | 7% |
| Construction du parc | 146 977 | 19% | 7 349 | 5% |
| Exploitation et Maintenance | 48 659 | 6% | 2 433 | 5% |
| Déconstruction du parc | 134 209 | 18% | 6 710 | 5% |
| Fret | 14 549 | 2% | 9 252 | 67% |
| Fin de vie | 4 864 | 1% | 2 432 | 50% |
| Total | 753 915 | 100% | 81 346 | 11% |

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 tout au long de sa vie.

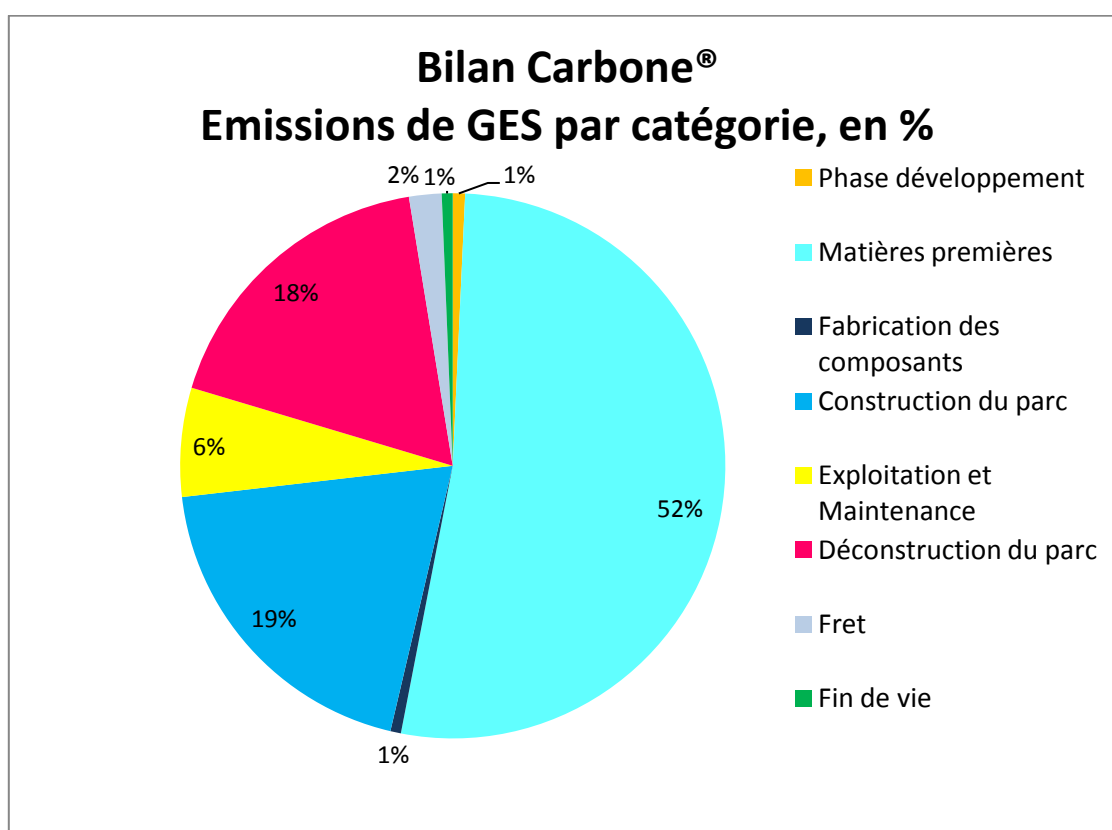


Figure 7 : Répartition des émissions de GES en équivalent CO₂ par catégorie

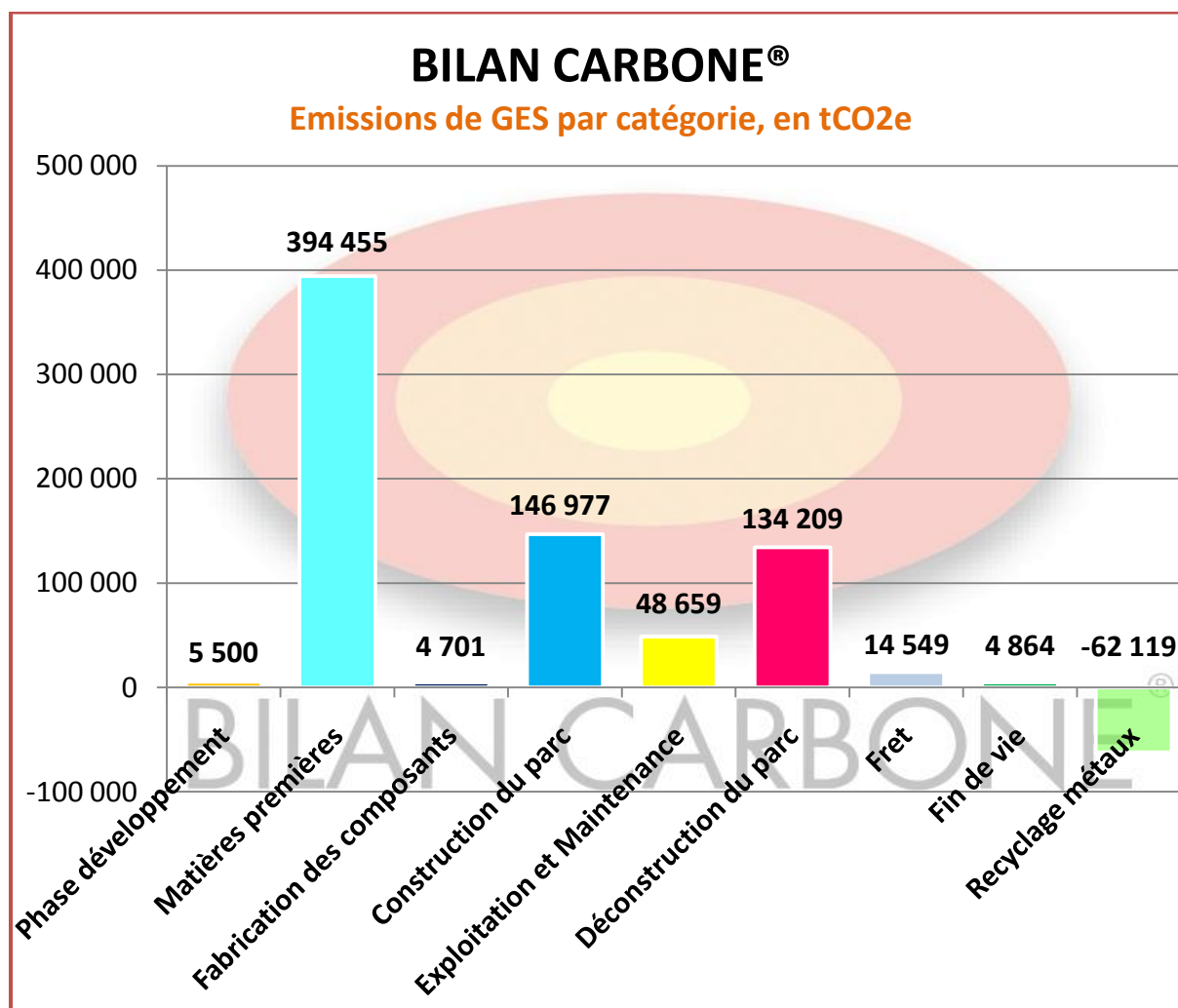


Figure 8 : Emissions de GES en tonnes équivalent CO₂ par catégorie

En conclusion les émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire sont estimées à **692 000 tonnes eq. CO₂** pour l'ensemble de la durée de vie du parc avec une incertitude de 81 000 tonnes eq. CO₂, si l'on intègre la valorisation des métaux en fin de vie équivalant à 62 000 tonnes eq. CO₂.

Sans intégrer la valorisation des métaux en fin de vie, les émissions totales sont de **754 000 tonnes eq. CO₂** 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 turbines.

Avec ses 80 turbines, la production d'électricité attendue pour les 24 ans d'exploitation du parc est estimée à **39 950 GWh**.

Les émissions de GES ramenées au kWh produit sont donc de
17,3 g eq. CO₂ / kWh produit en intégrant le recyclage des métaux en fin de vie
18,9 g eq. CO₂ / kWh produit sans intégrer le recyclage des métaux en fin de vie
+/- 2 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 | 17,3 (en intégrant la valorisation en fin de vie) 18,9 (sans compter la valorisation en fin de vie) |
| 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

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





Engagement de l'utilisateur à la méthode Bilan Carbone®

- ACQUISITION DES BASES DE LA METHODE BILAN CARBONE® - FORMATION Niveau 1

Je soussigné(e), LOUVEL Marie-Cécile désigné(e) par « l'utilisateur formé »,

De la structure professionnelle GIE ELIS, située : 31, rue Voltaire - 92803 PUTEAUX,

ayant suivi la formation « Acquisition des bases de la méthode Bilan Carbone® » du 18 au 19 novembre 2009, délivrée par l'ADEME, m'engage à :

- utiliser la méthode Bilan Carbone® conformément à l'utilisation qui m'a été enseignée et transmise en formation.
- ne pas utiliser la marque Bilan Carbone® pour un produit ou service non autorisé par l'ADEME ;
- ne pas supprimer la marque Bilan Carbone® sur le logiciel Bilan Carbone® ou sur une documentation Bilan Carbone® ;
- ne pas transmettre à titre onéreux ou gratuit la méthode Bilan Carbone® ;

Et reconnaît que :

- L'ADEME n'a aucune obligation de fournir une assistance technique à l'utilisateur formé pour l'assister dans l'exploitation de la méthode Bilan Carbone®, sauf à lui fournir des mises à jour au moment où elles seront disponibles.

Fait en 2 exemplaires, pour faire valoir ce que de droit,

Le 11/19/2009

Signature de l'utilisateur formé

Ce document ne fait pas office d'habilitation à réaliser des prestations Bilan Carbone® auprès de clients, celle-ci étant réservée aux stagiaires ayant suivi la formation « devenir un conseiller professionnel de la méthode Bilan Carbone® » de niveau 2