



Projet éolien d'Auzelon (03)

Fichier n° 4.6 – Bilan Carbone
(PJ 4)

Mai 2025



BORALEX

Bilan Carbone® du parc éolien d'Auzelon

Maître d'ouvrage

Boralex

BORALEX

Étude réalisée par :

Mathieu Bruneau



Le Bilan Carbone® permet de déterminer les postes d'émissions du projet éolien d'Auzelon. Le champ d'étude de ce bilan prend en compte la durée de vie totale du parc. Elle commence à la phase d'étude et traite jusqu'à la fin de vie du parc éolien.

Une étude de l'impact du changement de l'occupation des sols est ensuite réalisée pour estimer les évolutions de stocks carbonés sur les parcelles ainsi que l'éventuel impact du changement de pratique agricole sur la parcelle sur les émissions.

Structure		
Adresse	Siège : Parc ESTER Technopole 21 rue Columbia 87068 LIMOGES Antenne de Toulouse : 57 rue Bayard / 31000 Toulouse	
Téléphone	Siège : 05 55 36 28 39 Toulouse : 07 69 04 80 17	
Rédaction	Bruneau Mathieu, Responsable d'études expert	MB
Correction	Cantegril Valérian, Responsable du pôle Energie/Climat	VC
Validation	Cantegril Valérian, Responsable du pôle Energie/Climat	VC
Version	V1 10/09/2024	

Table des matières

1	Contexte	5
1.1	Introduction	6
1.2	Présentation du projet	7
2	Synthèse	28
2.1	Bilan Carbone®	29
2.2	Occupation des sols	29
3	Méthode	8
3.1	Le champ d'étude	9
3.2	Récolte des données et moyens utilisés	9
4	Évaluation carbone de l'installation	11
4.1	Phase de développement	12
4.2	Extraction et fabrication des éléments constitutifs	12
4.2.1	Tour, turbine et fondations	12
4.2.2	Transformateur	13
4.2.3	Raccordement électrique	14
4.2.4	Routes d'accès et plateformes	14
4.3	Phases de chantier	15
4.3.1	Acheminement des éoliennes	15
4.3.2	Installation	15
4.3.3	Désinstallation	16
4.4	Exploitation et maintenance	16
4.4.1	Transport des agents de maintenance	16
4.5	Démantèlement et recyclage du parc éolien	16
4.5.1	Transport des différents éléments vers les centres de valorisations des matériaux	16
4.5.2	Valorisation et recyclage des matériaux	17
4.6	Bilan	19
4.7	Émissions évitées, mix énergétique	24
5	Occupation des sols	25
5.1	Méthodologie - Outil ALDO	26
5.2	Stock carbone : occupation actuelle du sol	26
5.3	Conclusion	27
6	Tableaux - Cartes	28
7	Bibliographie	32



1 Contexte

1.1 Introduction

L'activité humaine génère directement ou indirectement des émissions de gaz à effet de serre (GES), responsables de l'effet de serre et du dérèglement climatique. Par conséquent, toute entreprise industrielle, commerciale, administrative ou associative a une préoccupation légitime envers ses émissions dues à ses activités.

Le Bilan Carbone® représente une méthode de quantification des émissions de gaz à effet de serre pour une meilleure évaluation des émissions liées à l'activité, qu'elles soient directes ou induites. C'est à la fois un instrument et une approche. La méthodologie utilisée permet d'inclure toutes les émissions, non seulement celles produites sur site, mais également celles qui contribuent en amont et en aval à la réalisation de l'activité principale.

Boralex projette d'établir un parc éolien sur les communes de Saint-Victor et Saint-Angel dans l'Allier (03). L'objectif est d'évaluer l'impact global en termes d'émissions de gaz à effet de serre du parc éolien tout au long de ses phases d'activité : études préliminaires, construction, exploitation, maintenance et désinstallation.

Cette analyse permet notamment de préciser les émissions de gaz à effet de serre et de les exprimer en tonnes équivalent CO₂ (tCO₂eq) ainsi qu'en grammes équivalents CO₂ par kilowattheure produit (gCO₂eq/kWh) ou en grammes équivalents CO₂ par kilowatt (gCO₂eq/kW). L'ADEME propose une empreinte carbone de l'éolien terrestre de 14,1 gCO₂/kWh¹. Mais ce chiffre dépend aussi de la méthodologie (périmètre d'étude pris en compte), de l'emplacement et la dimension du site, des aménagements prévus et technologies utilisées. Dans une démarche de transparence, Boralex a fait appel à ENCIS Environnement pour réaliser un Bilan Carbone® de leur parc éolien d'Auzelon le plus complet et clair possible.

Le bilan carbone du parc éolien d'Auzelon a été élaboré en utilisant les outils et la méthodologie du Bilan Carbone® (Version V8.10). Il a été réalisé par Mathieu Bruneau, qui a suivi la formation « Bilan Carbone® Module 2 : Maîtrise de la méthode », lui permettant de réaliser des bilans carbone certifiés « Bilan Carbone® ».

¹ <https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-carbone?docLink=Renouvelable>

1.2 Présentation du projet

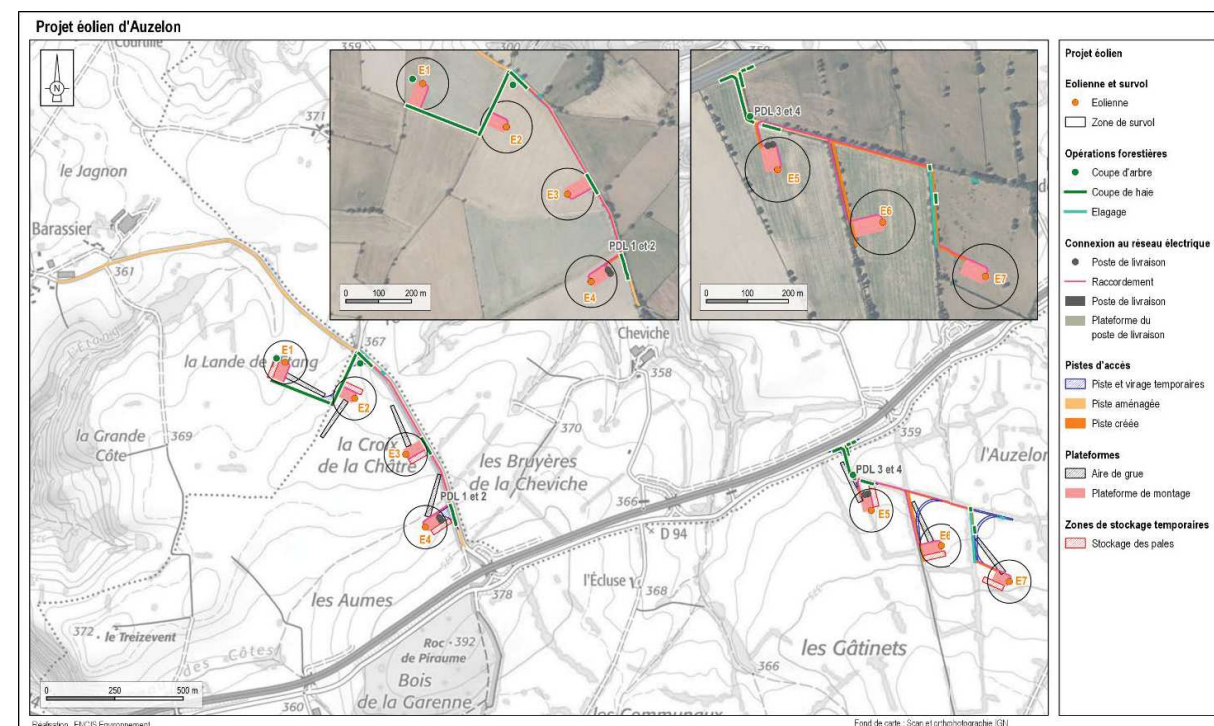
Le projet éolien est composé de sept éoliennes. Quatre modèles sont envisagés, ils sont résumés dans le tableau suivant :

	GE158	V150	N149	SG155
Diamètre rotor	158 m	150 m	149 m	155 m
Hauteur de mât	121 m	125 m	125,4 m	155 m
Puissance	6,1 MW	4,5 MW	5,9 MW	6,6 MW

Tableau 1 : Caractéristiques des modèles d'éoliennes à l'étude

Le modèle de turbine SG155 a été retiré des modèles envisagés ultérieurement à la rédaction de l'étude.

Le site se trouve dans les communes de Saint-Victor et Saint-Angel dans l'Allier (03).



Carte 1 : Plan de masse du projet d'Auzelon

2 Méthode

2.1 Le champ d'étude

Le champ de l'étude d'un Bilan Carbone® repose sur le cycle de vie complet du parc éolien. Il est découpé comme suit :

- développement du projet ;
- extraction et fabrication des éléments du parc éolien ;
- chantier ;
- opération et maintenance ;
- fin de vie.

Le bilan est réalisé sur l'installation éolienne, celle-ci étant définie par les éléments suivants :

- tour et turbine ;
- transformateurs ;
- plateformes ;
- raccordement électrique ;
- pistes renforcées et nouvelles pistes.

Le Bilan Carbone® présenté n'a pas la prétention d'être totalement exhaustif, et certains postes ont été omis en raison de la complexité de leur calcul et de leur caractère négligeable au regard de l'ensemble du cycle de vie de l'éolien. Ces choix découlent des retours d'expérience d'ENCIS Environnement ainsi que des multiples analyses de cycle de vie (ACV) menées dans la littérature. Les phases du cycle non prises en compte sont les suivantes :

- les déplacements employés hors développement, chantier et maintenance ;
- les activités d'administration ;
- les flux de matière et d'énergie engendrés par la ventilation, l'éclairage, les dispositifs de surveillance ;
- les éventuelles mesures de compensation engagées par le développeur.

Boralex s'inscrit dans une démarche écoresponsable en limitant au maximum les déplacements de plus de deux heures du projet. Les centres de développement et de maintenance sont décidés dans cet optique. Il en est de même pour les prestataires externes nécessaires lors des mesures ERC.

2.2 Récolte des données et moyens utilisés

Les données présentées proviennent des moyens suivants :

- tableur Bilan Carbone® version 8.10 ;
 - outil développé par l'Association pour la transition Bas Carbone qui délivre les formations Bilan Carbone® et définit la méthodologie du Bilan Carbone®
- données techniques constructeurs (ACV, documentation diverse, etc.) ;
- données techniques fournies par Boralex (étude de productible).

Actuellement, les constructeurs d'éoliennes ne sont pas encore au même niveau de maturité vis-à-vis de la production et du partage d'analyse de cycle de vie (ACV) de leur modèle :

- Vestas propose depuis plusieurs années les ACV de ses turbines qui sont complètes et propose une analyse de sensibilité sur plusieurs paramètres (puissance, taille de tour, etc.) ;
- Nordex n'a pas d'ACV disponible pour le modèle à l'étude ;
- Siemens-Gamesa produit une ACV ne possédant pas une ventilation des postes d'émissions satisfaisant pour l'adapter au projet d'Auzelon ;
- GE fournit une ACV trop succincte et ne présentant pas assez de détails sur le périmètre d'étude, la répartition des postes d'émissions (transformateurs) et sur la puissance des éoliennes étudiées notamment.

En accord avec Boralex, ENCIS Environnement propose d'étudier les analyses de cycle de vie pour des modèles Vestas dit équivalents, c'est-à-dire ayant une hauteur de moyeu, diamètre de rotor et puissance égaux ou très proches des modèles à l'étude.

Les correspondances proposées sont les suivantes :

Modèles à l'étude				Vestas équivalentes			
Nom	Puissance (MW)	Diam. Rotor (m)	Hauteur tour (m)	Nom	Puissance	Diam. Rotor (m)	Hauteur tour (m)
GE158	6,1	158	121	V162	6,2	162	119
V150	4,5	150	125	V150	4,5	150	125
N149	5,9	149	125,4	V150	6	150	125
SG155	6,6	155	155	V150	6	150	155

Tableau 2 : Définition des modèles Vestas équivalents aux quatre modèles d'éoliennes à l'étude

Les facteurs d'émissions sont assortis d'une marge d'incertitude déterminée par le rédacteur en fonction de la précision des données d'entrée. Ces facteurs d'émissions peuvent être adaptés en fonction des spécificités des données d'entrée, suivants qu'ils soient exprimés en équivalent CO₂ par tonne de matériaux utilisés ou en équivalent CO₂ par kilomètre parcouru en véhicule, par exemple.

Étant donné la période séparant la rédaction de la construction du parc éolien, il est important de noter que les données présentées dans le bilan carbone actuel pourraient sensiblement différer lors de la phase de construction du parc éolien. Dans cette optique, l'équipe de développement s'engage à privilégier des solutions qui émettent autant, voire moins de gaz à effet de serre qu'indiqué dans la présente étude, conformément à la démarche de réduction des impacts environnementaux.

Il est important de souligner que l'évaluation de l'empreinte carbone projetée pour le parc éolien ne doit pas être directement confrontée à d'autres analyses carbonées, sans tenir compte des variations méthodologiques inhérentes à chaque étude.

3 Évaluation carbone de l'installation

3.1 Phase de développement

La phase de développement englobe les émissions de CO₂eq générées pendant la planification du parc éolien, principalement attribuables aux déplacements des développeurs et des équipes de bureaux d'études (études d'impact, géotechniques, etc.). Dans un souci de simplification de la collecte de données, la base de données de l'ADEME² propose un ratio monétaire qui associe cette phase à un service tertiaire fortement matérialisé. Les coûts liés à la phase de développement sont estimés à 1 000 000 €.

Prix	Facteur d'émission	Émission en tCO ₂ eq	Incertitude
1 000 000 €	110 kgCO ₂ eq/k€	110	50 %

Tableau 3 : Calcul des émissions de GES liées à la phase de développement

L'incertitude est considérée forte (50 %) étant donné l'utilisation d'un ratio monétaire venant englober toute cette phase. Étant donné la faible participation de cette phase au bilan carbone de l'installation, il n'est pas nécessaire d'améliorer la précision des émissions associées.

3.2 Extraction et fabrication des éléments constitutifs

3.2.1 Tour, turbine et fondations

La fabrication des éoliennes et l'extraction de ses matières premières, sont les postes principaux d'émissions de GES. La société Vestas publie régulièrement, sur son site³, les analyses cycle de vie de ses turbines. ENCIS Environnement propose de prendre ces documents comme base pour le calcul de facteurs d'émission. Cela recense les émissions de GES pour les postes suivants d'extraction et fabrication :

- acier et béton des fondations ;
- turbine et tour, comprenant notamment les éléments suivants :
 - acier et fer ;
 - aluminium ;
 - polymères ;
 - verre et composants carbonés ;
 - composants électroniques ;
 - liquide de refroidissement.

Les valeurs de Vestas sont résumées dans le tableau suivant. Les facteurs d'émissions proposés ne prennent pas en compte l'acheminement, les étapes du chantier, le raccordement et les transformateurs et de fin de vie. Ces postes sont étudiées plus loin dans ce rapport.

² <https://base-empreinte.ademe.fr/>

³ <https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/lifecycle-assessments>

	GE158 (V162)	V150 4,5 MW	N149 (V150 6 MW - 125 m)	SG155 (V150 6 MW - 155 m)
Émissions (gCO ₂ eq/kWh) - partie construction	7,8	9,5	6,5	7,1
Production ACV (MWh/an)	21 568	14 962	22 011	22 011
Émissions tCO₂eq	3 360	2 792	2 864	3 165
Émissions totales tCO₂eq	23 521	19 544	20 047	22 158
Incertitudes	30 %	15 %	30 %	30 %

Tableau 4 : Émissions de GES (Source : Vestas)

L'incertitude sur la donnée est jugée faible (15 %) pour le scénario avec la V150, la donnée provenant d'une analyse de cycle de vie du constructeur. Pour les autres modèles, une incertitude de moyenne (30 %) est proposée, du fait du recours aux modèles Vestas équivalents.

3.2.2 Transformateur

Les transformateurs sont aussi émetteurs de GES du fait de la quantité de fer, cuivre et aluminium nécessaire à leur fabrication. Les ACV de Vestas avancent que les émissions carbonées liées à la fabrication des transformateurs représentent environ 1 % du total de la partie construction. Sans élément complémentaire, cette valeur est prise par défaut. Les émissions associées sont résumées dans le tableau suivant.

	GE158 (V162)	V150	N149 (V150 - 125 m)	SG 155 (V150 - 155 m)
Émissions transformateurs (tCO ₂ eq)	34	28	29	32
Émissions par Puissance (tCO ₂ eq/MW)	5,4	6,2	4,8	5,3
Émissions totales (tCO₂eq)	235	195	200	222
Incertitudes	30 %	15 %	30 %	30 %

Tableau 5 : Émissions poste de transformateurs

L'ADEME propose un chiffre de 10,9 kgCO₂eq/kVA (ADEME ; Jérôme Payet, 2012). Ce chiffre est obtenu à partir d'un transformateur de 1 MVA et ce chiffre est décrit comme non conservateur par l'ADEME. Le facteur d'émission est en accord avec *Life Cycle Assessment of Electrical Distribution Transformers: Comparative Study Between Aluminum and Copper Coils* (Mansilha, Brondani, Farret, Rosa, & Hoffmann, 2018) qui propose des émissions de 888 kgCO₂eq pour un transformateur de 75 kVA en cuivre.

Il a été décidé de garder le facteur d'émission de Vestas, ce dernier étant spécifique aux technologies utilisées.

3.2.3 Raccordement électrique

Cette partie traite du câblage et du raccordement. Boralex a fourni les informations sur les raccordements interne et externe envisagés. Le raccordement interne est supposé avec des câbles de 150 mm² en aluminium sur 2,0 km et de 400 mm² en cuivre sur 700 m. Le raccordement externe est supposé avec des câbles de 400 mm² en cuivre sur environ 6 km. En effet le poste source de Saint-Jacques est privilégié dans les hypothèses envisagées. Les facteurs d'émissions proviennent de la base de données INIES⁴.

Câblage	Facteur d'émission	Émissions en tCO ₂ eq	Incertitude
Raccordement interne 150 mm ²	35 700 kgCO ₂ eq/km	72	15 %
Raccordement interne 400 mm ²	57 800 kgCO ₂ eq/km	40	15 %
Raccordement externe 400 mm ²	57 800 kgCO ₂ eq/km	347	50 %

Tableau 6 : Calcul des émissions de GES liées au raccordement électrique

Seul le raccordement interne théorique est connu à ce jour. ENEDIS est décisionnaire sur le tracé exact et sur le poste source utilisé. L'incertitude est donc jugée forte (50 %).

3.2.4 Routes d'accès et plateformes

Les routes d'accès du projet comprennent les routes renforcées ou créées à l'occasion de la phase de chantier du parc éolien notamment. D'après les éléments fournis par Boralex, il y a 26 930 m² de surfaces de chemins renforcés ou créés, plateformes et poste de livraison. L'ADEME propose un chiffre de 76 tCO₂eq/km² (ADEME ; Jérôme Payet, 2012). Cela comprend la création de routes avec la fourniture du gravier, bitume et béton.

Afin de rester conservateur sur les émissions de ce poste et sans facteur d'émission complémentaire sur le renforcement des chemins, il a été choisi d'utiliser le même facteur d'émission pour les routes renforcées et créées, plateformes et poste de livraison.

Surface	Facteur d'émission	Émissions en tCO ₂ eq	Incertitude
0,02693 km ²	76 tCO ₂ eq/km ²	2047	30 %

Tableau 7 : Calcul des émissions de GES liées aux routes d'accès et aux plateformes

L'incertitude de cette donnée est jugée moyenne (30%).

⁴ <https://www.inies.fr/>

3.3 Phases de chantier

3.3.1 Acheminement des éoliennes

Concernant l'acheminement des turbines sur le site d'Auzelon, les hypothèses suivantes ont été prises en fonction des emplacements des usines des fabricants :

Modèle	Pays	Distance
GE158	Allemagne (Salzbergen)	950 km
V150	Danemark (Copenhague)	1 550 km
N149	Allemagne (Hambourg)	1 200 km
SG155	Espagne (Pampelune)	700 km

Tableau 8 : Distance au site d'Auzelon

D'après la documentation de Vestas, le poids total des éoliennes transportées est présenté ci-dessous :

Modèle	Poids unitaire (tonne)	Poids total (tonne)
GE158	594	4 158
V150	682	4 774
N149	687	4 809
SG155	777	5 439

Tableau 9 : Poids des éoliennes à l'étude

Les facteurs d'émissions proviennent de la base carbone de l'ADEME. L'incertitude associée au facteur d'émission est de 57 % pour le fret routier.

Modèle	Distance (km)	Poids (tonne)	Facteur d'émission (kgCO ₂ /tonne.km)	Émission en tCO ₂ eq	Incertain
GE158	950 km	4 158	0,0793	313	57%
V150	1 550 km	4 774	0,0793	587	57%
N149	1 200 km	4 809	0,0793	458	57%
SG155	700 km	5 439	0,0793	302	57%

Tableau 10 : Calcul des émissions de GES liées à l'acheminement des éoliennes

3.3.2 Installation

La phase de l'installation est émettrice de GES principalement à cause de l'utilisation de véhicules de chantier. Il est supposé que le chantier dure 12 mois avec un trafic journalier moyen de 3 camions qui parcourent une distance moyenne de 20 km/jour (distance aller-retour depuis Montluçon). Il est pris comme hypothèse de compter 10 ouvriers par jour qui viennent de 10 km du site en moyenne. On obtient un total d'émissions liées à l'installation de 12 tCO₂eq.

Il est donc choisi de prendre cette valeur avec une incertitude moyenne (30 %).

Émissions en tCO ₂ eq	Incertain
12	30 %

Tableau 11 : Calcul des émissions de GES liées à l'installation du parc

3.3.3 Désinstallation

Pour la désinstallation du parc, il a été décidé de prendre la même émission que pour son installation. Il a été choisi de garder cette valeur avec une incertitude moyenne (30 %).

Émissions en tCO ₂ eq	Incertain
12	30 %

Tableau 12 : Calcul des émissions de GES liées à la désinstallation du parc

3.4 Exploitation et maintenance

3.4.1 Transport des agents de maintenance

Il est supposé que le transport des agents de maintenance sur le site d'Auzelon se fait depuis le centre de maintenance Boralex de Cournon-d'Auvergne à environ 100 km. Deux visites par an sont envisagées. La maintenance doit durer 3 jours par éoliennes, 21 jours au total. Il est supposé qu'un cycle de visite nécessite 20 km/jours de maintenance.

L'ADEME propose 0,28 kgCO₂eq/km ce qui correspond à la consommation d'une fourgonnette de moins de 3,5 t.

Km de route parcourus	Facteur d'émission	Émissions en tCO ₂ eq	Incertain
37 200 km	0,28 kgCO ₂ eq/km	10,5	30 %

Tableau 13 : Calcul des émissions de GES liées aux routes d'accès

Le nombre de maintenance n'est pas encore entièrement défini et ne prend pas en compte d'éventuelles maintenances curatives, l'incertitude est donc jugée moyenne (30 %).

3.5 Démantèlement et recyclage du parc éolien

3.5.1 Transport des différents éléments vers les centres de valorisations des matériaux

A la fin de vie du parc éolien d'Auzelon, les différents éléments devront être recyclés ou valorisés. Boralex travaille avec l'entreprise de traitement des déchets Chimirex, dont le site de traitement le plus proche est à Courtenay, à environ 320 km du site d'Auzelon.

Modèle	Distance (km)	Poids (tonne)	Facteur d'émission (kgCO ₂ /tonne.km)	Émission en tCO ₂ eq	Incertain
GE158	320 km	4 158	0,0793	106	57%
V150	320 km	4 774	0,0793	121	57%
N149	320 km	4 809	0,0793	122	57%
SG155	320 km	5 439	0,0793	138	57%

Tableau 14 : Calcul des émissions de GES liées au transport des éoliennes vers les sites de recyclages

3.5.2 Valorisation et recyclage 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 détail des matériaux pris en compte est listé ci-dessous :

Type	GE158 (V162)	V150	N149 (V150 - 125 m)	SG 155 (V150 - 155 m)
Acier (tonne)	819	711	781	690
Aluminium (tonne)	9	7	11	11
Cuivre (tonne)	5	4	5	5
Polymère (tonne)	38	18	34	34
Verre/Céramique (tonne)	45	39	40	40
Béton (tonne)	2454	2015	2174	2174
Electronique (tonne)	7	4	7	7

Tableau 15 : Poids des matériaux (1 éolienne)

L'ADEME propose des facteurs d'émissions pour le traitement des types de déchets sur sa base Empreinte. Les polymères, le verre/céramique et l'électronique sont mis dans la catégorie « Autres » qui correspond à des « déchets non dangereux en mélange ».

Type	Facteur d'émission (kgCO ₂ eq/tonne) - traitement	Émissions en tCO ₂ eq	Incertitude
Béton	0,7	1,7	15 %
Métaux	4,0	3,3	15 %
Autres	8,6	0,8	15 %

Tableau 16 : Calcul des émissions de GES - Cas GE158

Type	Facteur d'émission (kgCO ₂ eq/tonne) - traitement	Émissions en tCO ₂ eq	Incertitude
Béton	0,7	9,7	15 %
Métaux	4,0	20,1	15 %
Autres	8,6	3,7	15 %

Tableau 17 : Calcul des émissions de GES - Cas V150

Type	Facteur d'émission (kgCO ₂ eq/tonne) - traitement	Émissions en tCO ₂ eq	Incertitude
Béton	0,7	10,5	15 %
Métaux	4,0	19,7	15 %
Autres	8,6	4,9	15 %

Tableau 18 : Calcul des émissions de GES - Cas N149

Type	Facteur d'émission (kgCO ₂ eq/tonne) - traitement	Émissions en tCO ₂ eq	Incertitude
Béton	0,7	10,5	15 %
Métaux	4,0	22,2	15 %
Autres	8,6	4,9	15 %

Tableau 19 : Calcul des émissions de GES - Cas SG155

Par ailleurs, le processus de recyclage des métaux leur permet d'être ensuite réutilisés. Le reste, notamment les pales (verre/céramique et polymères), n'est pas considéré comme recyclable pour l'instant. Les facteurs d'émissions par matériaux proviennent du tableau bilan carbone V8.10.

Matériaux	Émissions réduites par le recyclage (kgCO ₂ eq/tonne)
Aluminium	8 430
Acier	2 210
Béton	53
Cuivre	1 160

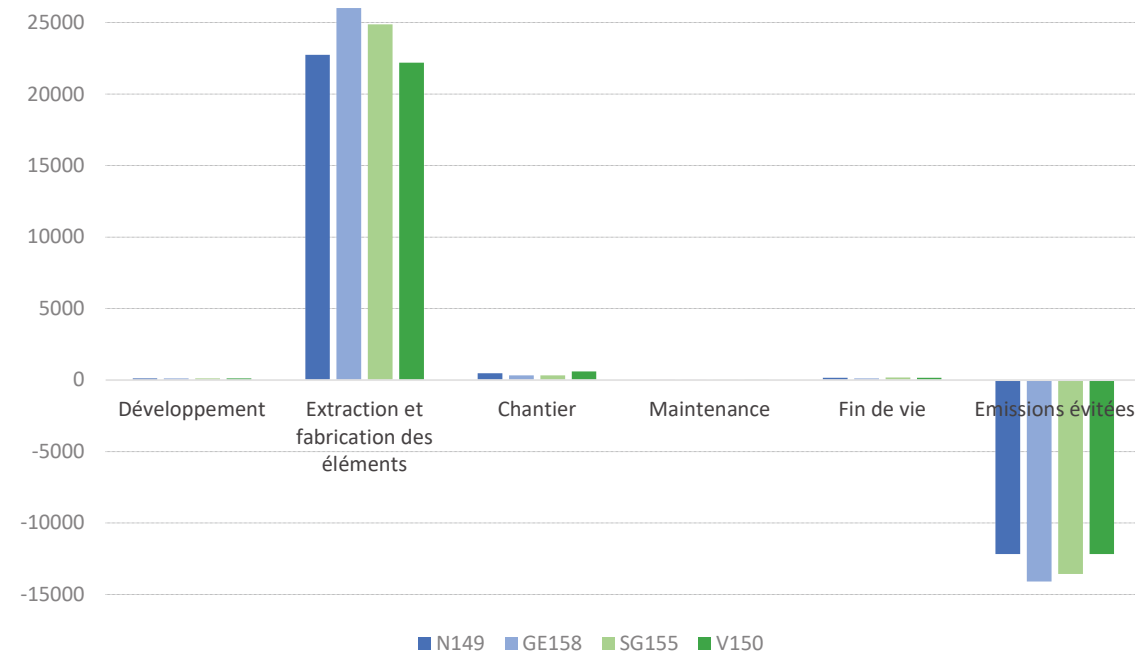
Tableau 20 : Facteurs d'émissions liées au recyclage (Source : ADEME)

Économies par valorisation	GE158 (V162)	V150	N149 (V150 - 125 m)	SG 155 (V150 - 155 m)
Émissions évitées métaux	13 183	11 421	11 351	12 753
Émissions évitées béton	910	748	807	807

Tableau 21 : Émissions évitées par valorisation

3.6 Bilan

Le tableau suivant synthétise les résultats du bilan carbone réalisé. La phase la plus émettrice de CO₂eq est celle d'extraction/fabrication des composants du parc éolien. Les deux plus gros postes sont les éoliennes ainsi que les voies d'accès et plateformes.



Graphique 1 : Répartition des émissions par phase

Phase	Secteur	Émissions (tCO ₂ eq)	Incertitude %	Incertitude (tCO ₂ eq)
Développement	Développement	110	50%	55,0
Extraction et fabrication des éléments	Eoliennes et fondations	23 521	30%	7056,3
	Transformateurs	235	30%	70,5
	Connexion interne	112	15%	16,8
	Connexion externe	347	50%	173,4
	Route d'accès	2 047	30%	614,0
Chantier	Acheminement des éoliennes - routier	313	57%	178,5
	Installation	12	30%	3,7
	Désinstallation	12	30%	3,7
Maintenance	Déplacement maintenance	11	30%	3,2
Fin de vie	Transport	106	57%	60,1
	Traitement béton	2	15%	0,3
	Traitement métal	3	15%	0,5
	Traitement autres	1	15%	0,1
Total		26 831	26%	7 088
Total/kW		628	26%	166
Total/kWh		11,8	26%	3,1
Émissions évitées (tCO₂eq)		-14 093		

Tableau 22 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas GE 158

Phase	Secteur	Émissions (tCO ₂ eq)	Incertitude %	Incertitude (tCO ₂ eq)
Développement	Développement	110	50%	55,0
Extraction et fabrication des éléments	Eoliennes et fondations	19 544	15%	2931,5
	Transformateurs	195	15%	29,3
	Connexion interne	112	15%	16,8
	Connexion externe	347	50%	173,4
	Route d'accès	1 999	30%	599,6
Chantier	Acheminement des éoliennes - routier	587	57%	334,5
	Installation	12	30%	3,7
	Désinstallation	12	30%	3,7
Maintenance	Déplacement maintenance	11	30%	3,2
Fin de vie	Transport	121	57%	69,1
	Traitement béton	10	15%	1,5
	Traitement métal	20	15%	3,0
	Traitement autres	4	15%	0,6
Total		23 083	13%	3 017
Total/kW		733	13%	96
Total/kWh		11,5	13%	1,5
Émissions évitées (tCO₂eq)			-12 168	

Tableau 23 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas V150

Phase	Secteur	Émissions (tCO ₂ eq)	Incertitude %	Incertitude (tCO ₂ eq)
Développement	Développement	110	50%	55,0
Extraction et fabrication des éléments	Eoliennes et fondations	20 047	30%	6014
	Transformateurs	200	30%	60,0
	Connexion interne	112	15%	16,8
	Connexion externe	347	50%	173,4
	Route d'accès	2 047	30%	614,0
Chantier	Acheminement des éoliennes - routier	458	57%	260,8
	Installation	12	30%	3,7
	Désinstallation	12	30%	3,7
Maintenance	Déplacement maintenance	11	30%	3,2
Fin de vie	Transport	122	57%	69,6
	Traitement béton	11	15%	1,6
	Traitement métal	20	15%	3,0
	Traitement autres	5	15%	0,7
Total		23 513	26%	6 055
Total/kW		569	26%	147
Total/kWh		10,5	26%	2,7
Émissions évitées (tCO₂eq)			-12 158	

Tableau 24 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas N149

Phase	Secteur	Émissions (tCO ₂ eq)	Incertitude %	Incertitude (tCO ₂ eq)
Développement	Développement	110	50%	55,0
Extraction et fabrication des éléments	Eoliennes et fondations	22 158	30%	6647
	Transformateurs	222	15%	33,3
	Connexion interne	112	15%	17
	Connexion externe	347	50%	173
	Route d'accès	2 047	30%	614
Chantier	Acheminement des éoliennes - routier	302	57%	172
	Installation	12	30%	4
	Désinstallation	12	30%	4
Maintenance	Déplacement maintenance	11	30%	3,2
Fin de vie	Transport	138	57%	78,7
	Traitement béton	11	15%	1,6
	Traitement métal	22	15%	3,3
	Traitement autres	5	15%	0,7
Total		25 508	26%	6 681
Total/kW		552	26%	145
Total/kWh		10,8	26%	2,8
Émissions évitées (tCO₂eq)		-13 560		

Tableau 25 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas SG 155

3.7 Émissions évitées, mix énergétique

La production d'électricité du parc éolien, estimée sur 30 ans, est résumé sur le tableau suivant.

	GE158 (V162)	V150	N149 (V150 – 125 m)	SG 155 (V150 – 155 m)
Production sur 30 ans (MWh)	2 280 000	2 020 000	2 215 000	2 370 000

Tableau 26 : Production électrique du parc d'Auzelon

Cette énergie électrique sera ajoutée au mix électrique français dans la part des énergies renouvelables. Au regard de la répartition de la production électrique française (« mix énergétique »), le coefficient d'émission de gaz à effet de serre du mix électrique français est d'environ 52 g éq.CO₂/kWh⁵. Il est de 264 g éq.CO₂/kWh⁶ pour les installations de l'Union Européenne.

Les émissions évitées en fonction des mix énergétiques sont résumées ci-dessous.

	GE158 (V162)	V150	N149 (V150 – 125 m)	SG 155 (V150 – 155 m)
Émissions évitées – cas mix énergétique français (tCO ₂ eq)	91 729	81 957	91 667	97 732
Émissions évitées – cas mix énergétique européen (tCO ₂ eq)	575 089	510 197	561 247	600 172

Tableau 27 : Émissions évitées - Cas du mix énergétique français et européen

⁵ Bilans GES de l'ADEME (www.bilans-ges.ademe.fr) – Mix électrique français moyen en 2022

⁶ Data Lab : Chiffres clés du climat, édition 2023 -

4 Occupation des sols

4.1 Méthodologie - Outil ALDO

ENCIS Environnement propose une évaluation de l'impact carbone lié au changement d'occupation des sols résultant de la construction du parc éolien d'Auzelon.

Cette évaluation s'appuie sur l'outil ALDO créé par l'ADEME qui fournit des estimations relatives aux quantités de carbone stockées dans les différents types de sols. Il a l'avantage de donner des valeurs contextualisées en fonction de la localisation géographique du site.

Il est important de noter que les données obtenues à partir de cet outil, sans être affinées à l'échelle parcellaire, doivent être considérées comme des ordres de grandeur. Ces données sont prises en compte comme des valeurs approximatives distinctes de l'évaluation carbone réalisée précédemment.

Dans le cadre de cette évaluation, une distinction sera faite entre les puits nets de carbone du projet et les émissions nettes de CO₂. La première illustrera le potentiel de captation de carbone sous forme de matière organique (sols et forêt). La seconde désigne une émission de carbone liée à la perte de potentiel d'un stock à cause de la destruction ou modification de celui-ci.

L'analyse de l'impact carbone sera donc faite de la manière suivante :

- analyse du potentiel carbone actuel de la parcelle à l'étude (émission et stock) ;
- analyse du potentiel carbone de la parcelle à l'étude (émission et stock) une fois le projet construit ;
- bilan des gains et pertes des stocks carbonés.

4.2 Stock carbone : occupation actuelle du sol

Borex a fourni le plan de masse qui permet de déduire les modifications de surfaces. 28 036 m² seront imperméabilisés par les fondations, les plateformes, les accès à créer permanents et le poste de livraison.

Type	Surface (ha)	Facteur (tC/ha)	Total (tC)	Total (tCO ₂ eq)
Prairies herbacées	2,8	69	193	708
Zone imperméabilisée	0,0	30	-	-
Total	2,8	-	-	708

Tableau 28 : Stock carbone présent sur le site avant-projet (Source : ALDO)

Type	Surface (ha)	Facteur (tC/ha)	Total (tC)	Total (tCO ₂ eq)
Prairies herbacées	0,0	69	-	-
Zone imperméabilisée	2,8	30	84	308
Total	2,8	-	-	308

Tableau 29 : Stock de carbone présent dans le sol suite au projet (Source : ALDO)

4.3 Conclusion

Initialement, la parcelle étudiée présentait un puits de carbone de 708 tCO₂eq, qui va diminuer pour atteindre 308 tCO₂eq.

Cette évolution va entraîner une variation de - 400 tCO₂eq dans le stock de carbone présent sur la parcelle.

5 Synthèse

5.1 Bilan Carbone®

Le Bilan Carbone® du parc éolien d'Auzelon montre que la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre (GES) provient de la phase d'extraction et de fabrication des composants du parc, principalement les éoliennes et les voies d'accès.

En l'absence de données suffisamment détaillées de la part d'une partie des turbiniers, des turbines aux caractéristiques équivalentes de Vestas ont été utilisées dans le cadre de la présente étude.

Phase	GE158 (V162)	V150 4,5 MW	N149 (V150 6 MW – 125 m)	SG155 (V150 6 MW - 155 m)
Développement (tCO ₂ eq)	110	110	110	110
Extraction et fabrication des éléments (tCO ₂ eq)	26 261	22 196	22 753	24 885
Chantier (tCO ₂ eq)	338	612	482	327
Maintenance (tCO ₂ eq)	11	11	11	11
Fin de vie (tCO ₂ eq)	111	155	157	176
Total (tCO₂eq)	26 831	23 083	23 513	25 508
Total/kW (tCO₂eq/kW)	628	733	569	552
Total/kWh (tCO₂eq/kWh)	11,8	11,5	10,5	10,8
Émissions évitées recyclages	-14 093	-12 168	-12 158	-13 560
Émissions évitées – cas mix énergétique français (tCO ₂ eq) Hypothèse 30 ans	- 91 729	- 81 437	- 93 487	- 97 732
Émissions évitées – cas mix énergétique européen (tCO ₂ eq) Hypothèse 30 ans	- 575 089	- 507 557	- 570 487	- 600 172

Tableau 30 : Répartition des émissions de GES sur le projet éolien d'Auzelon

5.2 Occupation des sols

Initialement, les parcelles étudiées présentaient un puits de carbone de 708 tCO₂eq, qui va diminuer pour atteindre 308 tCO₂eq.

Cette évolution va entraîner une variation de - 400 tCO₂eq dans le stock de carbone présent sur les parcelles.

6 Tableaux - Cartes

Tableau 1 : Caractéristiques des modèles d'éoliennes à l'étude.....	7
Tableau 2 : Répartition des émissions de GES sur le projet éolien d'Auzelon.....	29
Tableau 3 : Définition des modèles Vestas équivalents aux quatre modèles d'éoliennes à l'étude	10
Tableau 4 : Calcul des émissions de GES liées à la phase de développement	12
Tableau 5 : Émissions de GES (Source : Vestas).....	13
Tableau 6 : Émissions poste de transformateurs	13
Tableau 7 : Calcul des émissions de GES liées au raccordement électrique	14
Tableau 8 : Calcul des émissions de GES liées aux routes d'accès et aux plateformes.....	14
Tableau 9 : Distance au site d'Auzelon.....	15
Tableau 10 : Poids des éoliennes à l'étude.....	15
Tableau 11 : Calcul des émissions de GES liées à l'acheminement des éoliennes	15
Tableau 12 : Calcul des émissions de GES liées à l'installation du parc.....	16
Tableau 13 : Calcul des émissions de GES liées à la désinstallation du parc.....	16
Tableau 14 : Calcul des émissions de GES liées aux routes d'accès.....	16
Tableau 15 : Calcul des émissions de GES liées au transport des éoliennes vers les sites de recyclages	17
Tableau 16 : Poids des matériaux (1 éolienne)	17
Tableau 17 : Calcul des émissions de GES – Cas GE158	17
Tableau 18 : Calcul des émissions de GES – Cas V150	17
Tableau 19 : Calcul des émissions de GES – Cas N149.....	17
Tableau 20 : Calcul des émissions de GES – Cas SG155.....	18
Tableau 21 : Facteurs d'émissions liées au recyclage (Source : ADEME).....	18
Tableau 22 : Émissions évitées par valorisation	18
Tableau 23 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas GE 158	20
Tableau 24 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas V150.....	21
Tableau 25 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas N149	22
Tableau 26 : Émissions dues à la création du parc éolien d'Auzelon – Cas SG 155	23
Tableau 27 : Production électrique du parc d'Auzelon.....	24
Tableau 28 : Émissions évitées - Cas du mix énergétique français et européen	24
Tableau 29 : Stock carbone présent sur le site avant-projet (Source : ALDO)	26
Tableau 30 : Stock de carbone présent dans le sol suite au projet (Source : ALDO)	27
Carte 1 : Plan de masse du projet d'Auzelon.....	7

7 Bibliographie

- ADEME ; Jérôme Payet. (2012). *référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par méthode d'analyse du cycle de vie*.
- ArcelorMittal. (2023). *Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit - Palplanches EcoSheetPile Plus d'ArcelorMittal*.
- Ekonomou A., D. J. (2020). Greenhouse Accounting Framework for Beef and Sheep properties based on the Australian National Greenhouse Gas Inventory methodology. Beta version by Integrity Ag and Environment.
- Fronius International GmbH. (2023). *Fronius GEN24 Plus – A Benefit for the Environment Life Cycle Assessment*.
- Laura Tschümperlin, P. S. (2016). *Life cycle assessment of low power solar inverter (2.5 to 20 kW)*.
- Mansilha, M. B., Brondani, M., Farret, F. A., Rosa, L. C., & Hoffmann, R. (2018). Life Cycle Assessment of Electrical Distribution Transformers: Comparative Study Between Aluminum and Copper Coils. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*.
- SMA. (s.d.). *Sunny Highpower PEAK3 Life cycle assessment (LCA)*.