

Analyse de Cycle de Vie

Parc éolien Les Grand Vallées



ACV d'un parc de 17 MW composé de 4 éoliennes
Communes de Neuvy-en-Dunois (28800)

Commanditaire de l'étude :

Innergex

Adrien Tardy - ATardy@innergex.com

Coordinateur ACV :

Ronan Cousquer – Kapstan

Date de publication :

Septembre 2025

Table des matières

1.	Résultats de l'ACV	3
2.	Périmètre de l'étude ACV.....	6
3.	Présentation du projet	7
4.	Méthodologie ACV	8
5.	Productible	10
6.	Emissions évitées	11
7.	Temps de retour carbone.....	12
8.	Bilan énergétique	13
9.	Mesures ERC du projet.....	14
10.	Analyse des résultats	14

1. Résultats de l'ACV

La société Innergex a mandaté le bureau d'études Kapstan pour la réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) du parc éolien « Les Grandes Vallées » installé sur la commune de Neuvy-en-Dunois (28800). Cette ACV est basée sur **toute la durée de vie du parc** (construction, exploitation et fin de vie) afin de calculer **son intérêt environnemental sous la forme d'économies d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'un bilan énergétique**.

Les résultats de l'ACV de la centrale sont présentés ci-dessous :

Caractéristiques



4 éoliennes de 4.26MW
48 GWh/an pendant 20 ans¹

Bilan carbone parc



724 kgCO₂/kW
12.6 gCO₂eq/kWh

Bilan énergétique²

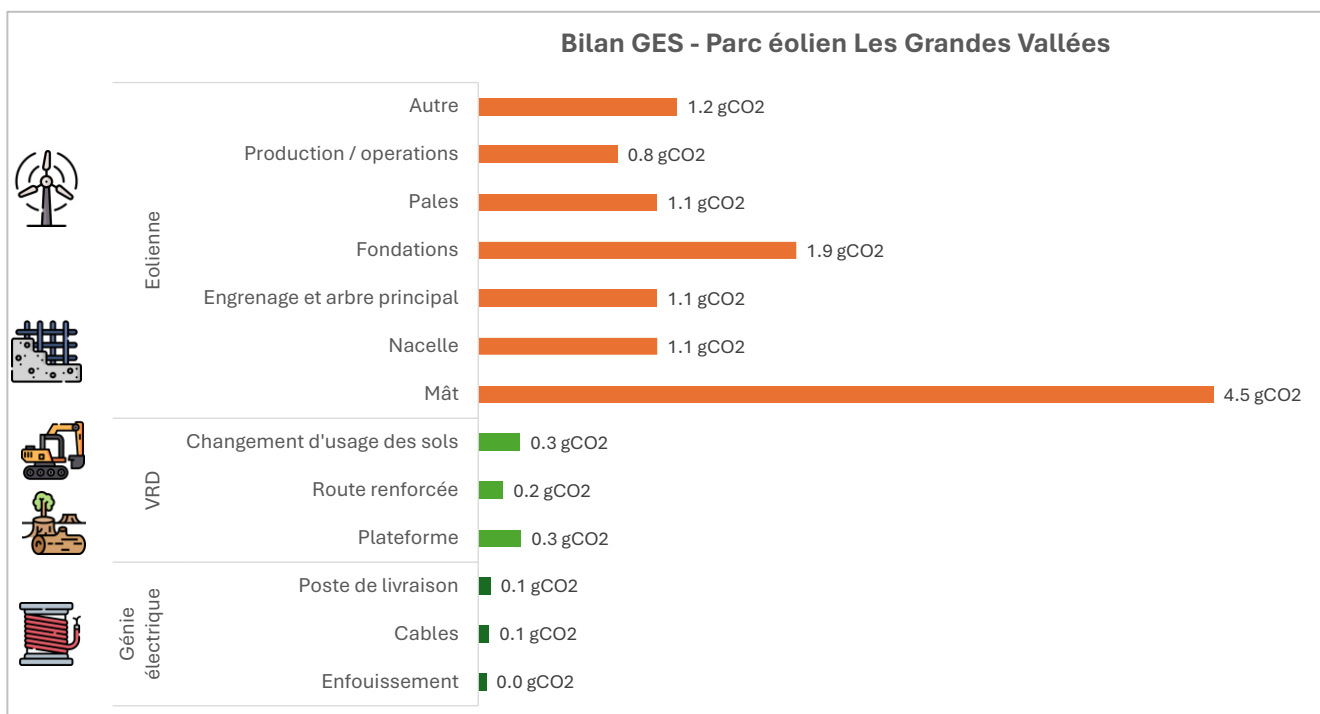


Rendement: x61
Temps de retour: 4 mois

Temps de retour carbone



4 ans

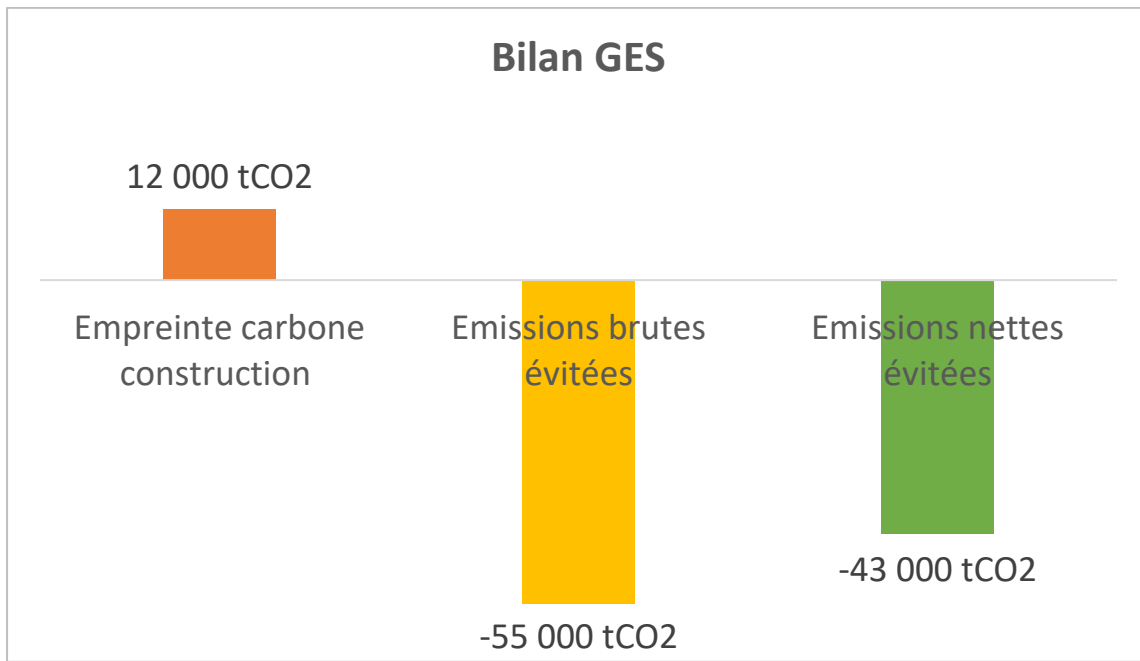


¹ Le parc est conçu pour durer entre 35 ans à 40 ans mais par convention, et pour rester conservateur, une durée de vie identique à celle du référentiel de l'ADEME est considérée pour toutes les parcs éoliens : 20 ans.

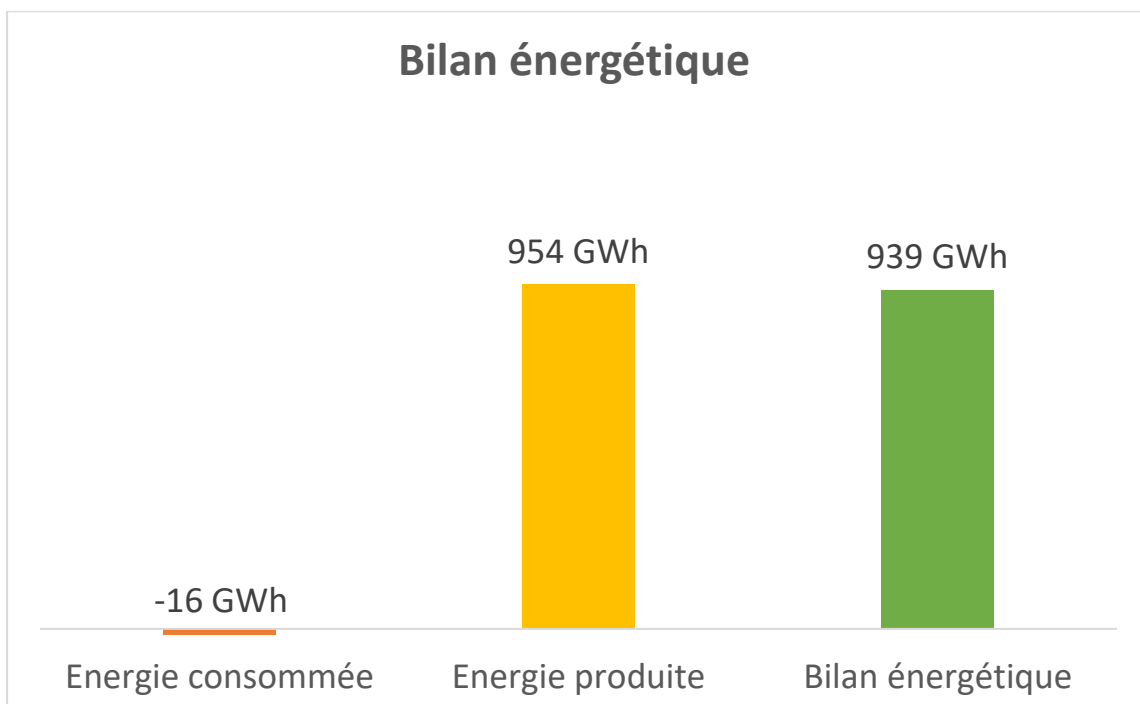
² Pour chaque kWh consommé pour construire le parc, 61 kWh sont produits en retour sur 20 ans permettant de rentabiliser le projet en 4 mois seulement.

Le graphique ci-dessous présente le potentiel de décarbonation du projet basé sur :

- L'empreinte carbone liée à la construction du parc.
- Les émissions brutes évitées liées à l'électricité non produite et remplacée par celle produite par le parc éolien.
- Les émissions nettes évitées.



Le même graphique est présenté ci-dessous du point de vue énergétique :



Les résultats de l'ACV sont présentés par poste dans le tableau ci-dessous :

	Empreinte carbone			Consommation énergétique		
	TCO2 / éolienne	gCO2/kWh	%	MJ/ éolienne	MJ/kWh	%
Eolienne						
Mât	1 066	4.47	35.6%	12 020 670	0.05	26.7%
Nacelle	259	1.09	8.6%	3 968 910	0.02	8.8%
Engrenage et arbre principal	259	1.09	8.6%	4 279 080	0.02	9.5%
Fondations	461	1.93	15.4%	4 095 510	0.02	9.1%
Pales	259	1.09	8.6%	4 880 430	0.02	10.8%
Production / operations	202	0.85	6.7%	2 449 710	0.01	5.4%
Autre	288	1.21	9.6%	5 456 460	0.02	12.1%
VRD						
Plateforme	62	0.26	2.1%	1 989 329	0.01	4.4%
Route renforcée	36	0.15	1.2%	1 151 741	0.00	2.6%
Changement d'usage des sols	61	0.26	2.0%		-	0.0%
Génie électrique						
Poste de livraison	18	0.07	0.6%	382 500	0.00	0.8%
Cable 1x240mm ² - Al	1	0.00	0.0%	154 743	0.00	0.3%
Enfouissement câbles	1	0.01	0.0%	19 982	0.00	0.0%
Génie électrique - Poste source						
Cable 1x400mm ² - Al	14	0.06	0.5%	1 940 487	0.01	4.3%
Enfouissement câbles	10	0.04	0.3%	146 743	0.00	0.3%
Fin de vie						
Désinstallation & recyclage	-	1 076	-	4.51	-35.9%	-
Total	3 084	12.6		45 031 525	0.19	
Total - avec recyclage	2 007	8.1		34 587 025	0.14	

Tableau 1 : Résultats de l'ACV par poste

L'éolienne représente la plus grosse du bilan GES (78%). Cette partie inclut la fabrication, le transport et l'installation de l'éolienne. Le reste de l'empreinte carbone est principalement composé des fondations (15%) et de la VRD³ (5%).

La ligne « Désinstallation & recyclage » affiche une valeur négative car elle intègre les émissions évitées potentielles grâce au recyclage de l'éolienne en fin de vie. **Cependant, étant donné que ce recyclage reste hypothétique, il ne peut pas être inclus de manière formelle dans l'analyse.** Cette information est donc fournie à titre indicatif et souligne l'importance du recyclage, qui pourrait réduire l'empreinte carbone du parc de 36% à terme.

³ Construction des routes et des plateformes

2. Périmètre de l'étude ACV

Le périmètre de l'étude est donné ci-dessous :

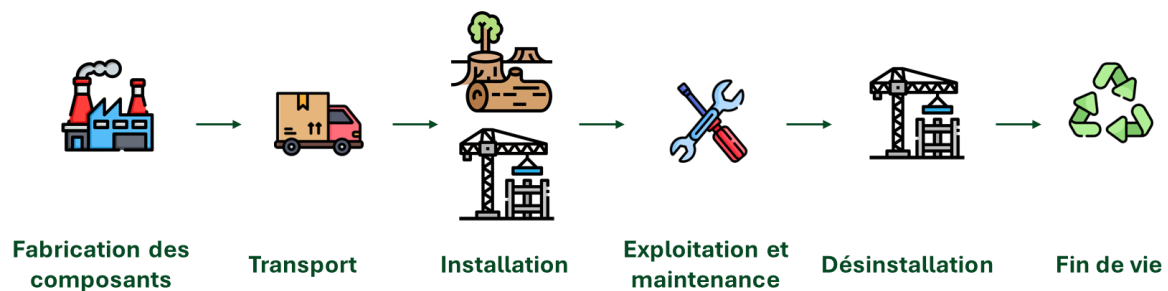
Définition des objectifs de l'étude	
Application envisagée	Calcul du bilan carbone et énergétique du parc éolien
Raison de l'étude	Demande d'autorisation environnementale.
Public ciblé	La société d'exploitation du parc éolien des Grandes Vallées, les services instructeurs et le public souhaitant consulter le dossier de demande d'autorisation environnementale.
Commanditaire de l'étude	Parc éolien des Grandes Vallées SAS

Tableau 2: Définition des objectifs de l'étude

Champ de l'étude	
Unité fonctionnelle	1 kWh produit par le parc éolien pendant sa durée de vie et injecté dans le réseau
Lieu d'installation du parc	Dans la commune de Neuvy-en-Dunois (28800)
Catégories d'impact et méthodes	Changement climatique – IPCC 2021 à 100 ans – kgCO ₂ -eq Consommation d'énergie primaire (MJep)

Tableau 3 : Champ de l'étude

L'ACV est basée sur toute la durée de vie du parc de sa construction à sa fin de vie :



3. Présentation du projet

Le parc se compose :

- De 4 éoliennes dont le modèle n'est pas encore figé. Les caractéristiques de la VESTAS V136 et de son ACV sont utilisées dans cette étude.
- D'un raccordement des éoliennes au poste source.
- De 9 900 m² de pistes en GNT en phase chantier.
- De 17 000 m² de plateforme en GNT en phase chantier.
- Le parc est installé sur un terrain agricole. Le seul changement d'usage des sols en phase d'exploitation correspond aux surfaces de routes et de plateformes créées (environ 1ha de surface cultivée).

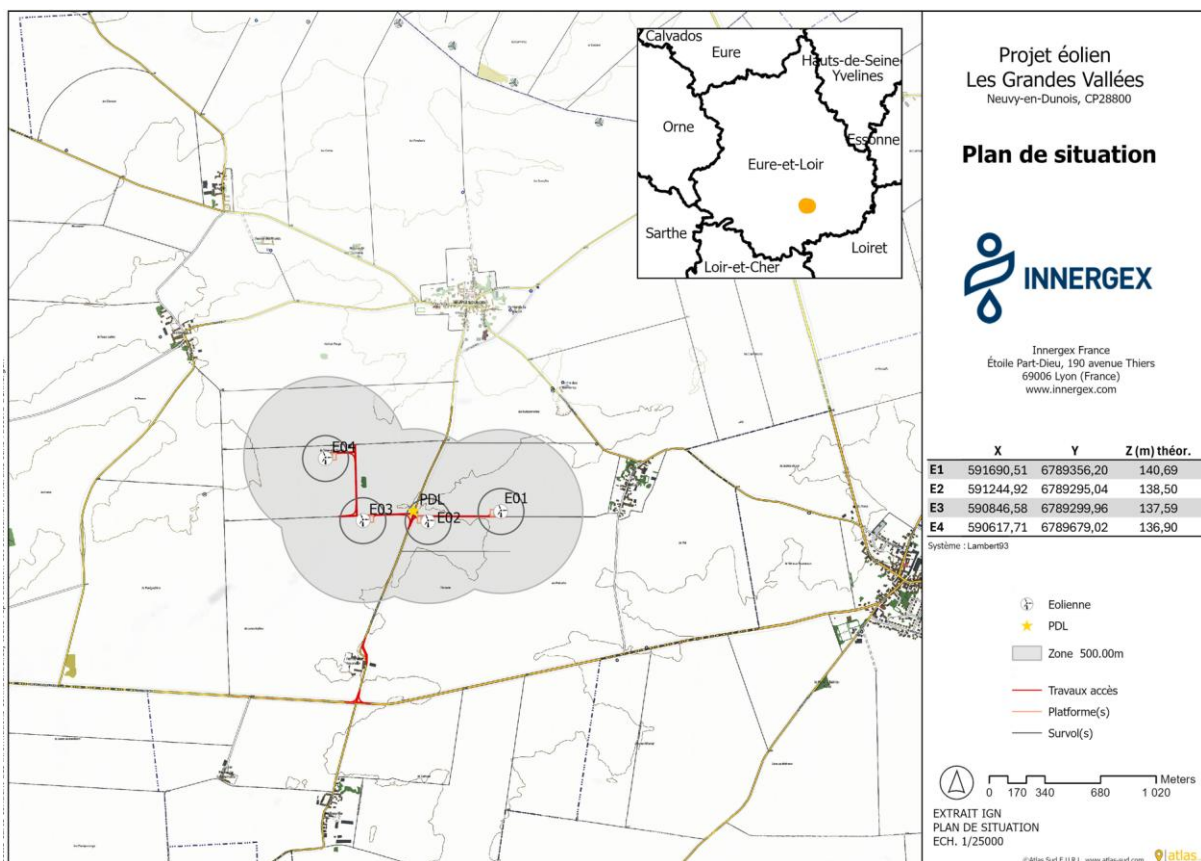


Figure 1. Plan de situation du parc

4. Méthodologie ACV

Calcul des facteurs d'impacts

L'ACV est basée sur les référentiels suivants :

- NF EN ISO 14040 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie ;
- ISO 14067:2018 - Gaz à effet de serre — Empreinte carbone des produits ;
- ILDC Handbooks relative to Life Cycle Analysis;
- Le guide méthodologique « Prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact » du Ministère de la Transition écologique
- Base de données secondaires : Ecoinvent 3.10 et base empreinte de l'ADEME.
- Base ALDO de l'ADEME pour le calcul de l'impact du changement d'usage des sols

La méthodologie utilisée et les quantités prises en compte pour chaque processus sont données ci-dessous :

	Quantité par éolienne	Facteur d'émissions
Eolienne		
Mât	112 m	ACV Vestas
Nacelle	ACV Vestas	ACV Vestas
Engrenage et arbre principal	ACV Vestas	ACV Vestas
Fondations	ACV Vestas	ACV Vestas
Pales	68 m	ACV Vestas
Production / operations	ACV Vestas	ACV Vestas
Autre	ACV Vestas	ACV Vestas
VRD		
Plateforme	4273 m ²	Kapstan - Plateforme
Route renforcée	0.5 km	Kapstan - Route renforcée
Changement d'usage des sols	0.8 ha	Base Aldo
Génie électrique		
Poste de livraison	0.3 pcs	Kapstan - poste de livraison
Cable 1x240mm ² - Al	409 m	Kapstan - Cable 1x240mm ² - Al
Enfouissement câbles	409 m	Ecoinvent - Excavation
Génie électrique - Poste source		
Cable 1x400mm ² - Al	3 000 m	Kapstan - Cable 1x400mm ² - Al
Enfouissement câbles	3 000 m	Ecoinvent - Excavation
Fin de vie		
Désinstallation & recyclage	ACV Vestas	ACV Vestas

Tableau 4 : Méthodologie ACV

Calcul du facteur d'impact Éolienne

Le facteur d'impact de l'éolienne est basé sur l'ACV de Vestas pour l'éolienne V136:

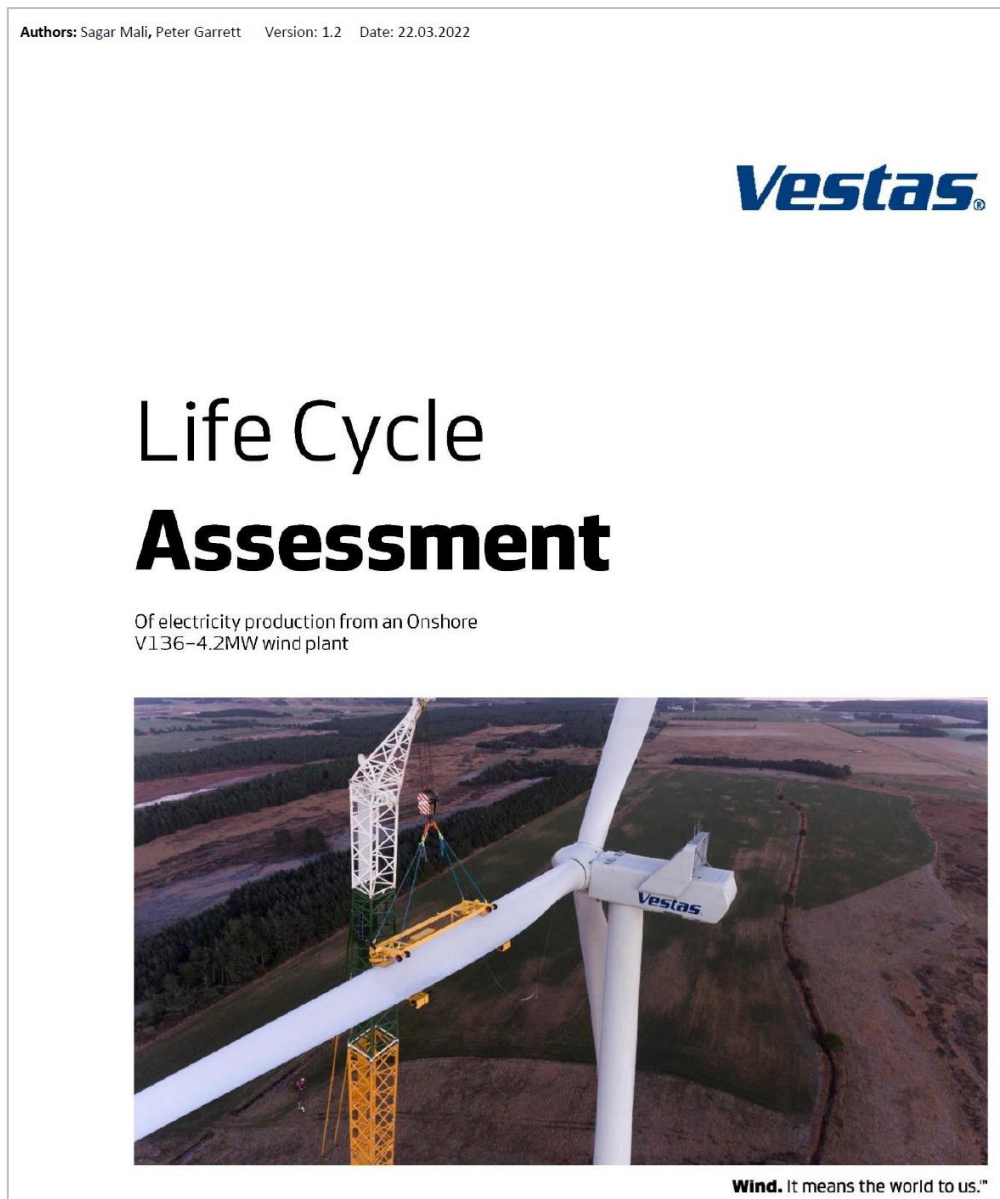


Figure 2 : ACV V136 – Vestas

Les modifications suivantes ont été faites :

- La fin de vie est exclue de l'analyse car les émissions évitées sont hypothétiques.
- L'empreinte carbone en gCO₂/kWh est basée sur la production réelle du site et non pas celle considérée dans l'ACV.

ACV Vestas			
Informations générales			
Année de publication	2022	Méthode de caractérisation :	
Normes	ISO 14040 (2006), ISO 14044 (2006)	Changement climatique	
Etude réalisée par	Vestas Wind Systems A/S - Priyanka Razdan, Peter Garrett	IPCC 2007 à 100 ans – kgCO ₂ -eq	
Périmètre de l'étude			
Production des composants	✓	Unité fonctionnelle	
Installation	✓	1 kWh of electricity delivered to the grid by a 100MW wind power plant	
Utilisation	✓		
Maintenance / réparation	✓		
Fin de vie (démantèlement, traitement des déchets)	✓		
Informations techniques			
Périmètre de l'étude	100 MW éolien	Eoliennes	24 éoliennes
Durée de vie prise en compte	20 ans	Hauteur mât AC	112 m
Production retenue	7 596 GWh	3 798 Longueur pales	68 m
Résultats de l'étude : changement climatique			
Impact carbone par kWh - Sans fin de vie	9.10 gCO ₂ -eq / kWh		
Impact carbone par kWh - Fin de vie	3.4 gCO ₂ -eq / kWh		
Impact carbone par kWh - Total	5.7 gCO ₂ -eq / kWh		
Empreinte carbone par élément			
	gCO₂/kWh	kgCO₂ / Eolienne	Adaptation du modèle
Mât	3.37	1 065 656	Pas de changement
Nacelle	0.82	259 214	Pas de changement
Engrenage et arbre principal	0.82	259 214	Pas de changement
Fondations	1.46	460 824	Pas de changement
Pales	0.82	259 214	Pas de changement
Cables	0.27	86 405	Modélisation Kapstan - Données réelles du parc
Production / operations	0.64	201 611	Pas de changement
Autre	0.91	288 015	Pas de changement
Fin de vie	(3.40)	(1 076 100)	Analysée de manière séparée

Tableau 5 : Données ACV Vestas

5. Productible

Le productible fourni par Innergex est de 11,928 GWh/éolienne/an pour l'ensemble du parc sur une durée de 20 ans.

Les éoliennes installées peuvent potentiellement fonctionner durant 35 à 40 ans, mais la durée de 20 ans a été considérée pour être cohérente avec l'étude de l'ADEME de 2017 et pour rester conservatrice.

6. Emissions évitées

Le calcul d'émissions de CO₂-eq évitées est basé sur la différence entre :

- L'impact carbone du kWh produit par le parc éolien (en gCO₂-eq/kWh)
- Et l'impact carbone du kWh moyen théoriquement remplacé, basé sur le mix électrique moyen français : 58gCO₂-eq/kWh⁴.

Le calcul des émissions évitées basé sur le kWh français est considéré comme conservateur pour les raisons suivantes :

- Le mix remplacé par le développement des capacités renouvelables est plus carboné que le mix moyen français. Cette différence est principalement due :
 - Au système de « Merit order » (une énergie bas-carbone remplace en priorité les sources d'énergies plus carbonées).
 - L'interconnexion avec les autres pays européens ayant un mix électrique plus carboné.
- Malgré les objectifs nationaux de sobriété énergétique, de nouvelles capacités de production d'électricité sont nécessaires. Elles permettent en effet de répondre à l'augmentation des besoins électriques bas-carbone de certains secteurs (l'automobile, par exemple). Ainsi, le développement des EnR s'inscrit dans une logique d'augmentation de la capacité de production d'électricité afin de réduire la consommation d'énergie fossile, plutôt que dans le remplacement des sources existantes.
- Ainsi, le kWh substitué serait supérieur à 58 gCO₂/kWh.

Résultats de l'Analyse du Cycle de Vie		
	12 334	tCO₂-eq
Empreinte carbone	12.6	gCO ₂ -eq/kWh
	724	kgCO ₂ -eq/kW
Durée de vie	20	années
Production totale	954	GWh
Emissions évitées		
Mix électrique France	58	gCO ₂ /kWh
Emissions brutes évitées	2 767	tCO ₂ -eq/an
	55 346	tCO₂-eq (total)
Emissions nettes évitées	2 151	tCO ₂ -eq/an
	43 012	tCO₂-eq (total)
Temps de retour CO ₂ -eq	4	ans

⁴ Source : Electricité/2023 - mix moyen/consommation – Base Empreinte ADEME

7. Temps de retour carbone

Le temps de retour carbone correspond à l'équilibre entre :

- La construction de la centrale, **source d'émissions de CO2**
- Pendant son fonctionnement, **une réduction des émissions de CO2** car l'électricité produite par la centrale remplace une autre source de production d'électricité.

Bilan carbone centrale



12.6 gCO2eq/kWh

Bilan carbone substitué



58 gCO2eq/kWh

Le temps de retour carbone est donné ci-dessous :

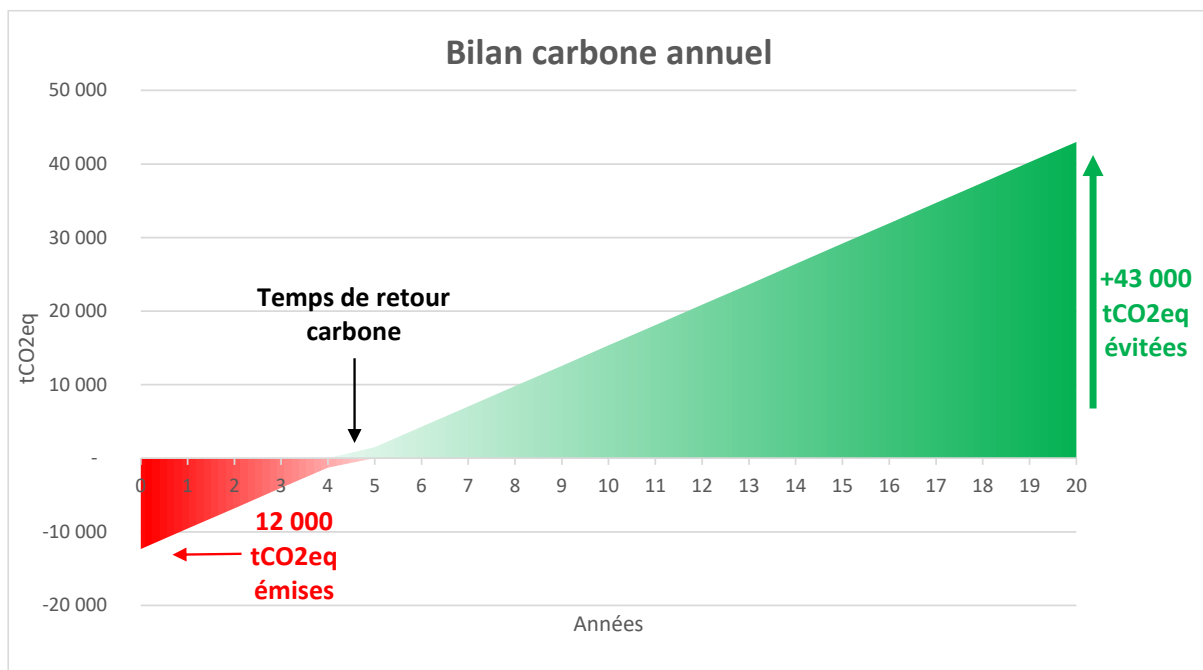


Figure 3: Bilan carbone cumulé annuel

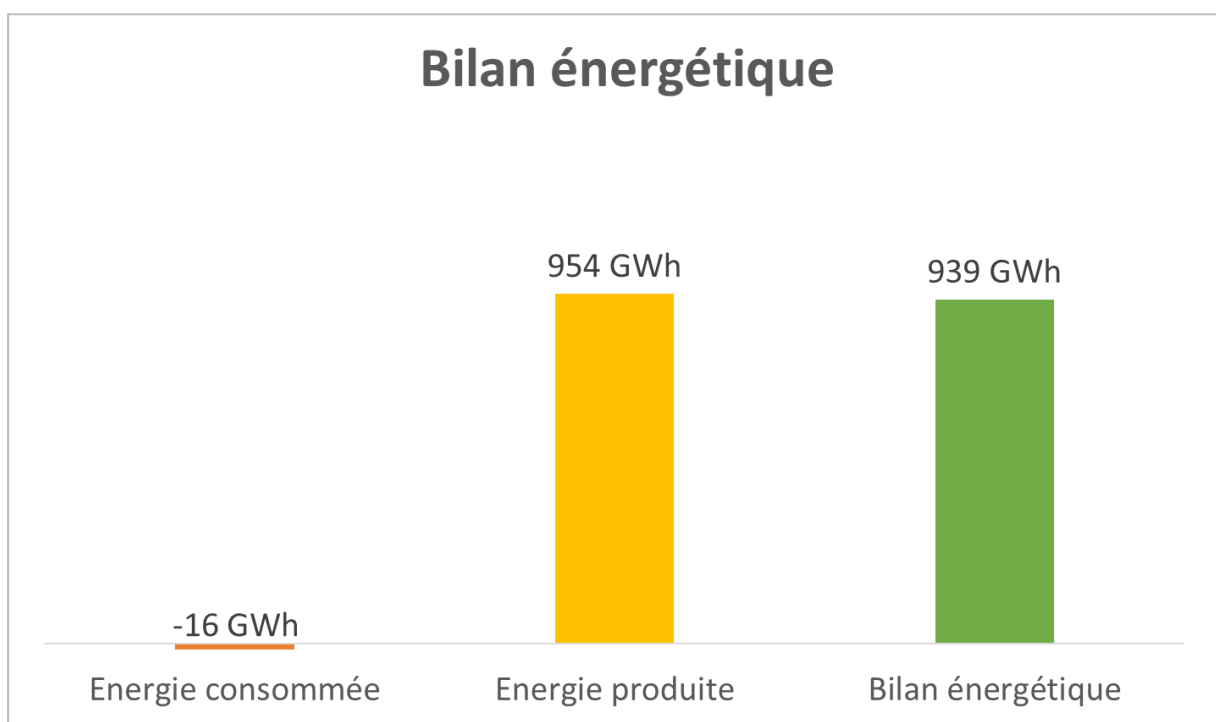
8. Bilan énergétique

Le bilan énergétique du projet permet de comparer :


- L'énergie qui a été nécessaire pour fabriquer les composants de la centrale et leur installation
- L'énergie produite par la centrale

Ces deux quantités d'énergie sont comptabilisées en MJ d'énergie primaire ou en kWh d'énergie finale afin de les rendre comparables.

En France, il faut 12 MJ d'énergie primaire pour produire 1 kWh d'électricité.



Comme présenté dans le graphe ci-dessus, le ratio énergétique entre la construction de la centrale et sa production est :

 **Ratio énergétique : x61**

Ce projet présente ainsi un temps de retour énergétique de :

 **Temps de retour énergétique : 4 mois**

9. Mesures ERC⁵ du projet

Afin de limiter l'effet du projet sur le réchauffement climatique, les actions suivantes sont prévues par Innergex :

- Les éoliennes choisies sont produites en Europe et présentent une empreinte carbone plus faible que celle d'autres fabricants, notamment asiatiques.
- Le bon recyclage des éoliennes a un impact positif potentiel majeur en fin de vie. Il permettrait de baisser l'empreinte carbone de 36%. Le parc passerait alors de 12.6 à 8.1 gCO₂/kWh
- Le choix de pistes légères au lieu d'un enrobage standard permet de réduire l'empreinte de la route de 42%
- Le sol est remis à l'état initial après l'installation du raccordement au poste source, permettant de limiter l'impact du projet sur le changement d'usage des sols.
- Les raccordements choisis sont basés sur des câbles en aluminium et non pas en cuivre permettant ainsi de réduire l'empreinte carbone du raccordement.

10. Analyse des résultats

Pertinence

Kapstan a réalisé de nombreuses études ACVs multi-critères dans l'éolien. La catégorie d'impacts « Réchauffement climatique » est l'indicateur qui ressort en premier lors d'une normalisation des indicateurs selon la méthodologie Product Environmental Footprint (PEF).

La deuxième catégorie est celle de « l'épuisement des ressources naturelles » liée à la consommation d'énergie fossile et de métaux pour la fabrication des composants du parc. Cette catégorie est un enjeu au niveau de la filière dans son ensemble et sur lequel un développeur de projets a peu de visibilité et de pouvoir de décision.

Il est donc pertinent d'analyser la pertinence environnementale d'un projet éolien selon la catégorie d'impacts « Réchauffement climatique ».

Complétude

L'étude intègre toutes les émissions de GES pertinentes.

⁵ Les mesures ERC (éviter, réduire, compenser) ont pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits.

Cohérence

Les résultats de l'étude sont cohérents avec d'autres études récentes faites par Kapstan dans l'éolien. Les données importantes ont été vérifiées.

La valeur par défaut de l'ADEME est de 14.1gCO₂/kWh.

Exactitude

Le niveau d'incertitude des données primaires (dimensionnement de la centrale et productible) est faible car le développement du projet est suffisamment avancé.

Le niveau d'incertitude des données secondaires (ACV, référentiel méthodologique sectoriel ou base de données Simapro) est faible.

Transparence

Les méthodes de calcul, hypothèses, sources de données utilisées et incertitudes associées au calcul des émissions et aux différents scénarios utilisés sont incluses dans ce rapport afin d'assurer un niveau suffisant de transparence.