

6. Le projet en phase d'exploitation

6.1. Travaux nécessaires en phase d'exploitation

Les travaux nécessaires pendant l'exploitation du parc éolien seront essentiellement des travaux de maintenance ainsi que de réparations en cas de problèmes éventuels.

Une **maintenance prédictive et préventive** des éoliennes peut être mise en place. Celle-ci porte essentiellement sur l'analyse des huiles, l'analyse vibratoire des machines tournantes et l'analyse électrique des éoliennes. La maintenance préventive des éoliennes a pour but de réduire les coûts d'intervention et d'immobilisation des éoliennes. En effet, grâce à la maintenance préventive, les arrêts de maintenance peuvent être programmés et optimisés afin d'intervenir sur les pièces d'usure avant que n'intervienne une panne. Les arrêts de production d'énergie éolienne sont anticipés pour réduire leur durée et leurs coûts.

Ces vérifications seront effectuées au moins au bout de trois mois après la mise en service des éoliennes, puis au bout d'un an de fonctionnement et enfin périodiquement tous les trois ans, conformément à l'arrêté du 26 août 2011. Les opérations de maintenance courante seront répétées lors de l'inspection après la première année de fonctionnement, puis régulièrement selon un calendrier de maintenance précis.

Une **maintenance curative** pour l'éolienne est prévue dès lors qu'un défaut a été identifié lors d'une analyse ou dès qu'un incident (par exemple un foudroiement) a endommagé une composante de l'éolienne. Les techniciens de maintenance éolienne se chargent alors de réparer, de remettre en fonctionnement et de reconnecter les machines au réseau.

Les tableaux ci-après détaillent les vérifications qui seront effectuées au bout de trois mois après la mise en service des machines ainsi que les opérations de maintenance supplémentaires lors des inspections annuelles, telles que fournies par le fabricant des éoliennes Vestas.

Tableau 29 : Principales opérations de maintenance lors de l'inspection des 3 mois (Source : EISE, Vestas)

Composants	Opérations
Etat général	Vérification de la propreté de l'intérieur de l'éolienne
	Vérification qu'aucun matériau combustible ou inflammable n'est entreposé dans l'éolienne
Moyeu	Inspection visuelle du moyeu
	Vérification des boulons entre le moyeu et les supports de pale*
	Vérification des boulons maintenant la coque du moyeu

Composants	Opérations
Pales	Vérification des roulements et du jeu Vérification des joints d'étanchéité Inspection visuelle des pales, de l'extérieur et de l'intérieur Vérification des boulons de chaque pale* Vérification des bruits anormaux Vérification des bandes paratonnerres
Système de transfert de courant foudre Moyeu / nacelle	Vérification des boulons et de l'absence d'impacts de foudre.
Arbre principal	Vérification des boulons fixant l'arbre principal et le moyeu* Inspection visuelle des joints d'étanchéité Vérification des bruits anormaux et des vibrations Vérification du fonctionnement du système de lubrification Vérification des dommages au niveau des boulons de blocage du rotor
Système d'orientation de la nacelle (Yaw system)	Vérification des boulons fixant le haut du palier d'orientation et la tour* Vérification des bruits anormaux Vérification du système de lubrification
Tour	Vérification de l'état du béton à l'intérieur et à l'extérieur de la tour Vérification des boulons entre la partie fondation et la tour, entre les sections de la tour et sur l'échelle* Vérification des brides et des cordons de soudure Vérification des plateformes Vérification du câble principal Inspection visuelle du mât
Bras de couple	Vérification boulons Vérification et serrage de la connexion à la terre
Système d'inclinaison des pales (Vestas Pitch System)	Vérification des boulons du cylindre principal et du bras de manivelle Vérification des boulons de l'arbre terminal et des roulements
Multiplicateur	Changement d'huile et nettoyage du multiplicateur si nécessaire Vérification du niveau sonore lors du fonctionnement du multiplicateur Vérification des joints, de l'absence de fuite, etc... Vérification d'absence de fuites au niveau des points de lubrification Vérification des capteurs de débris
Huile du multiplicateur	Vérification du niveau d'huile Vérification des composants du bloc hydraulique et des pompes

Composants	Opérations
Système de freinage	Vérification des étriers, des disques et des plaquettes de freins Inspection des entrées et des sorties de tuyaux
Générateur	Vérification des câbles électriques dans le générateur Vérification des fuites de liquides de refroidissement et de graisse Lubrification des roulements
Système de refroidissement par eau	Vérification du fonctionnement des pompes à eau Vérifications des tubes et des tuyaux Vérification du niveau de liquide de refroidissement
Vestas Cooler Top™	Vérification boulons
Système hydraulique	Vérification d'absence de fuites dans la nacelle, l'arbre principal et les pompes
Onduleur	vérification du fonctionnement de l'onduleur.
Capteur de vent et balisage aérien	Vérification du bon fonctionnement du balisage aérien et inspection visuelle du capteur de vitesse de vent.
Nacelle	Vérification boulons Vérification d'absence de fissures autour des raccords Vérification des points d'ancrage et des fissures autour de ceux-ci
Extérieur	Vérification de la protection de surface Nettoyage des têtes de boulons et d'écrous, des raccords, etc...
Transformateur	Inspection mécanique et électrique du transformateur
Sécurité générale	Inspection des câbles électriques Inspection du système de mise à la terre

Tableau 30 : Opérations de maintenance supplémentaires lors des inspections annuelles (Source : EISE, Vestas)

Composants	Opérations
Moyeu	Vérification de l'état de la fibre de verre Vérification des joints d'étanchéité Vérification de la fonctionnalité des trappes d'accès et de leurs verrous
Pales	Vérification des tubes de graissage et du bloc de distribution de graisse Vérification du niveau de graisse dans les collecteurs de graisse et remplacement s'ils sont pleins Remplissage du distributeur de graisse
Système de transfert de courant foudre Moyeu / nacelle	Vérification du câble connectant les bandes anti-foudre Vérification des amortisseurs d'usure Vérification des bandes anti-foudre

Composants	Opérations
	Vérification du bon fonctionnement du système d'inclinaison des pales
Système d'inclinaison des pales (Vestas Pitch System)	Vérification de la pression des accumulateurs Vérification de la tension des fixations des accumulateurs Vérification des boulons Vérification des pistons des vérins hydrauliques
Arbre principal	Vérification et lubrification des roulements principaux tous les 5 ans Vérification de l'ajustement des capteurs RPM Lubrification des boulons de blocage du rotor
Bras de couple	Vérification des boulons entre le bras de couple et le bâti tous les 4 ans
Multiplicateur	Vérification et remplacement (si nécessaire) des filtres à air Remplacement des filtres à air tous les 10 ans Remplacement du système de détection de particules tous les 10 ans Vérification des flexibles de drainage. Remplacement si nécessaire. Remplacement des flexibles de drainage tous les 10 ans Remplacement des tuyaux tous les 7 ans Inspection des boulons du système d'accouplement entre le multiplicateur et l'arbre principal tous les 4 ans Extraction d'un échantillon d'huile pour analyse
Système de freinage	Vérification du câblage des capteurs d'usure et de chaleur Remplacement des plaquettes de freins tous les 7 ans
Générateur	Vérification du bruit des roulements Vérification du système de graissage automatique Vérification du système de refroidissement
Système de refroidissement par eau	Remplacement du liquide de refroidissement tous les 5 ans
Système hydraulique	Vérification des niveaux d'huile et remplacement si nécessaire Extraction d'un échantillon d'huile pour analyse Changement d'huile selon les rapports d'analyse Remplacement des filtres (tous les ans, tous les 2 ans ou tous les 4 ans, selon le filtre) Remplacement des filtres (tous les ans, tous les 2 ans ou tous les 4 ans, selon le filtre) Contrôle des flux et de la pression Vérification de la pression dans le système de frein
Vestas Cooler Top™	Inspection visuelle du Vestas Cooler Top™ et des systèmes parafoudres
Onduleur	Vérification du bon fonctionnement de l'onduleur Remplacement des différents filtres des ventilateurs Remplacement des différents ventilateurs tous les 5 ans Remplacement de la batterie tous les 5 ans

Composants	Opérations
Capteur de vent et balisage aérien	Inspection visuelle du capteur de vitesse de vent et du bon fonctionnement du balisage.
Nacelle	Changement des filtres à air Changement des batteries des processeurs
Tour	Changement des filtres de ventilation contaminés Maintenance de l'élévateur de personnes
Système de détection d'arc électrique	Test du capteur de détection d'arc électrique du jeu de barres et dans la salle du transformateur
Système d'orientation nacelle (Yaw System)	Lubrification de la Couronne d'orientation Vérification du niveau d'huile des motoréducteurs, et remplissage si besoin Changement de l'huile des motoréducteurs tous les 10 ans Vérification et ajustement du couple de freinage
Armoire de contrôle en pied de tour	Test des batteries Remplacement des batteries de secours tous les 5 ans Remplacement des radiateurs en cas de défaillance
Sécurité générale	Test des boutons d'arrêt d'urgence Test d'arrêt en cas de survitesse Vérification des équipements de sauvetage Vérification de la date d'inspection des extincteurs Test des détecteurs de fumée (si installés) Vérification du système antichute

6.2. Puissance nominale du parc éolien

La puissance nominale électrique du futur parc éolien de Fère-Champenoise est de **13,2 MW s'il est composé des éoliennes Vestas V117-3,3 et de 12 MW s'il est composé des éoliennes Nordex N117-3.**

La production d'électricité du parc éolien sera acheminée sur le réseau national. Il est donc primordial de connaître la capacité d'accueil et de transport de ce réseau.

Pour le parc éolien de Fère-Champenoise, un seul poste de livraison sera nécessaire afin d'acheminer l'énergie produite. D'après les informations obtenues à ce jour par ENEDIS, le poste de livraison pourra être raccordé au poste source de Mery Nord, en cours de réalisation, dont la capacité d'accueil réservée aux énergies renouvelables au titre du S3REnR est actuellement de 179,3 MW et approuvée en décembre 2015.

Les éléments dont dispose Green Energy 3000 GmbH permettent d'estimer qu'un raccordement, depuis le poste de livraison, au poste source nécessite entre 16 et 18 kilomètres de câbles. Le coût d'un tel raccordement est estimé entre **3,5 et 4 millions** d'euros et avec un délai d'environ un an.

6.3. Énergie produite par le parc éolien

La production en électricité du futur parc a été estimée en interne à l'aide du logiciel WindPro.⁹ Pour cela, une vitesse moyenne théorique a été définie pour chaque éolienne en fonction des données à disposition (cartographies du gisement éolien par exemple).

L'annexe 6 présente l'ensemble des résultats de calculs de simulation WindPro dans le cadre du projet de Fère-Champenoise. Ces résultats sont également présentés de manière concise ci-après. Les tableaux ci-après montrent donc une estimation de la production d'électricité annuelle du parc éolien (production nette, tenant compte des pertes par effet de sillage et de la densité de l'air), calculée de façon très conservatrice.

6.3.1. Estimation de la production d'électricité de l'ensemble du parc

Tableau 31 : Productible annuel du parc (Source : WindPro, document interne)

Décomposition du productible	Résultat avec pertes de sillages	Résultat -10,0 %	Résultat BRUT (sans pertes)	Rendement
Unité	MWh/an	MWh/an	MWh/an	%
Ensemble des éoliennes	29 587,5	26 628,8	30 700,9	96,4

Tableau 32 : Résultats spécifiques (Source : WindPro, document interne)

Résultats spécifiques	Taux d'utilisation	Production moyenne par éolienne	Heures équivalentes pleine charge	Vitesse moyenne du vent au moyeu
Unité	%	MWh/an	Heures/an	m/s
Ensemble des éoliennes	23	6 657,2	2 017	5,9

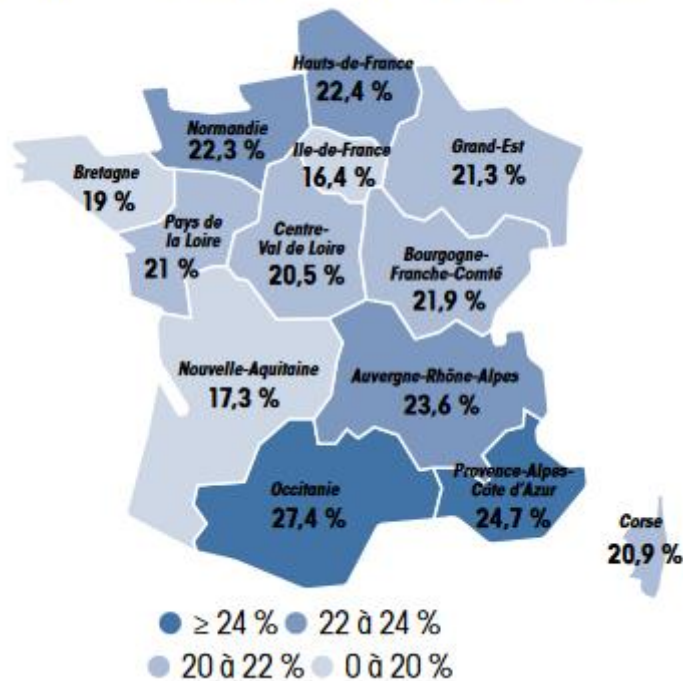
Avec des vitesses de vent moyennes de 5,9 m/s, un nombre d'heures de fonctionnement équivalentes pleine puissance de 2017 et des éoliennes de type V117 d'une puissance nominale de 3,3 MW, la production annuelle du futur parc éolien de Fère-Champenoise est estimée à **29 587 MWh/an**. Cette estimation prend en compte les pertes de sillage,¹⁰ inévitables dans le cadre d'énergie éolienne.

⁹ WindPRO est un logiciel spécialisé dans la modélisation de parcs éoliens (calculs de productibilité, calculs des influences des projets éoliens sur les riverains, etc.).

¹⁰ A l'arrière d'une éolienne, un sillage tourbillonnaire se développe. Dans ce sillage, la vitesse moyenne du vent est diminuée puisque l'éolienne a capté une partie de l'énergie cinétique du vent naturel et l'intensité de turbulence est augmentée. Le vent partant de l'hélice a une capacité énergétique plus faible que le vent arrivant dans l'hélice.

Le rendement du parc éolien de Fère-Champenoise est donc estimé à 96,4 % et le taux d'utilisation (également appelé facteur de charge ou facteur d'utilisation)¹¹ à 23 %. Ce facteur est supérieur au facteur de charge moyen de l'ensemble du parc éolien français qui était de 21,7 % en 2016¹². Il ne faut toutefois pas oublier qu'en raison des fluctuations des conditions de vent le facteur de charge est variable d'une année à une autre. Il a été par exemple de 23 % en 2014 en France.

Facteur de charge éolien moyen en 2016



En prenant en compte une consommation annuelle moyenne de 2 000 kWh par an et par personne, le futur parc éolien de Fère-Champenoise permettra donc d'alimenter environ 14 800 habitants en électricité renouvelable chaque année.

Figure 38 : Facteur de charge moyen de la filière éolienne en 2016
(Source : RTE, Enedis, Panorama de l'électricité renouvelable : 2016)

¹¹ Le facteur de charge ou facteur d'utilisation d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produit si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période.

¹² Source : RTE, Enedis, Panorama des énergies renouvelables

6.3.2. Productible annuel des 4 éoliennes du parc

Le tableau ci-après montre le productible annuel estimé pour chacune des 4 éoliennes du futur parc éolien de Fère-Champenoise.

Tableau 33 : Production d'électricité annuelle des 4 éoliennes du parc (Source : WindPro, document interne)

N° de l'éolienne	Modèle	Puissance nominale	Vitesse moyenne du vent	Production annuelle	Production annuelle - 10 %	Rendement
<i>Unité</i>		<i>MW</i>	<i>m/s</i>	<i>MWh/an</i>	<i>MWh/an</i>	<i>%</i>
F1	V117	3,3	5,87	7593,3	6.834	99,19
F2	V117	3,3	5,86	7326,9	6.594	95,96
F3	V117	3,3	5,86	7194,7	6.475	94,19
F4	V117	3,3	5,91	7472,6	6.725	96,15

6.3.3. Baisse estimée du productible dû au dispositif de bridage chauves-souris

Dans le cadre du projet éolien de Fère-Champenoise, il est prévu d'installer un système de bridage chauve-souris sur l'ensemble des éoliennes, comme le préconise l'étude chiroptérologique (cf. Etudes complémentaires et expertises complémentaires « Étude d'impact chiroptérologique du projet d'implantation du parc éolien de Fère-Champenoise », afin de réduire fortement (baisse de 70 à 90 %) la mortalité de ces populations.

L'installation de ce système pourra respecter le protocole suivant :

- Lorsque la vitesse du vent est inférieure à 6 m/s ;
- Absence de pluie ;
- Entre début mars à mi-mai et entre mi-juillet à fin octobre ;
- Entre 1 heure avant le coucher du soleil et une heure après le lever du soleil.

En raison du faible intérêt de la zone pour les chiroptères en termes de terrain de chasse et de la faible activité enregistrée sur le site avec les détecteurs ultrasons, les experts naturalistes ne recommandent pas un bridage sur l'ensemble de l'année.

Les retours d'expériences de ce type de bridage installé sur d'autres parcs éoliens en France comme en Europe ont montré une baisse drastique de la mortalité des chauves-souris (allant jusqu'à 90 % - cf. *annexe 16 de l'étude d'impacts*-) ainsi qu'une baisse de la production liée au système comprise entre 1 % et 4 %, selon le mode de bridage et l'environnement du site d'implantation¹³.

Dans le cadre d'un projet éolien, comme celui de Fère-Champenoise, il a été estimé par les experts naturalistes une perte de production de l'ordre de 1,5 à 3 % (source interne à l'entreprise).

En effet, la mise en place du système de bridage chauves-souris est relativement restreinte, en raison du faible intérêt de la zone pour les chiroptères. Dans le cas précis du projet éolien de Fère-Champenoise, il s'agit de réduire principalement le risque de mortalité concernant les chiroptères migrateurs (pour plus de détails se référer à l'étude d'impacts chiroptérologique du projet d'implantation du parc éolien de Fère-Champenoise).

¹³ Sources de l'annexe 12 de l'étude d'impacts :
EXEN Expertises en Environnement, KJM Conseil Environnement, Chauves-souris et éoliennes : comprendre l'activité pour mieux maîtriser les risques de mortalité, 2013 ;
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Guide sur l'application de la réglementation relative aux espèces protégées pour les parcs éoliens terrestres, 2013

Ainsi et afin de prendre tous les cas de figures, 3 scénarios seront analysés dans le cadre du projet de Fère-Champenoise :

- 1) Aucune baisse de la production (scénario n°1) ;
- 2) Une baisse de la production de 1,5 % (scénario n°2) ;
- 3) Une baisse de la production de 3 % (scénario qui représente ici le pire des cas).

NB : Une baisse de la production de 4 % liée au système de bridage concerne un protocole plus contraignant et une zone dont l'intérêt chiroptérologique est beaucoup plus important que celui relevé pour le projet éolien de Fère-Champenoise. Il a donc été décidé d'établir le scénario qui représente le pire des cas avec une baisse de la production de 3 %.

Le tableau suivant montre donc la production estimée du futur parc éolien, suite à la mise en place du bridage et prenant en compte les 3 scénarios évoqués ci-dessus :

Décomposition du productible	Résultat avec pertes de sillages	Résultats -1,5 %	Résultats - 3%
<i>Unité</i>	<i>MWh/an</i>	<i>MWh/an</i>	<i>MWh/an</i>
Ensemble des éoliennes	29 587,5	29 143,2	28 699,4

6.4. Bilan carbone : évaluation sur le modèle V112-3,0 MW

Le point suivant présente de manière détaillée le bilan carbone du modèle d'éolienne Vestas V112-3,0 MW, tel que fournit par le fabricant.

Bien qu'il s'agisse d'un autre modèle d'éolienne dans le cadre du projet de parc éolien sur la commune de Fère-Champenoise (éolienne V117-3,3 MW), les résultats fournis ci-après sont du même ordre de grandeur et permettent d'apprécier la performance environnementale de l'éolienne choisie, tout au long de son cycle de vie.

6.4.1. Cadre de l'étude

Le Bilan Carbone® est une méthode, développée par l'ADEME, de comptabilisation des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à partir de données facilement disponibles pour parvenir à une bonne évaluation des émissions directes ou induites par une activité ou un territoire. Elle s'applique à toute activité : entreprises industrielles ou tertiaires, administrations, collectivités et même au territoire géré par les collectivités.

Cette évaluation est la première étape indispensable pour réaliser un diagnostic « effet de serre » d'une activité. En hiérarchisant les postes d'émissions en fonction de leur importance, il est alors plus facile de prioriser les actions de réduction des émissions les plus efficaces. La société VESTAS a sollicité le cabinet de conseil PE North West Europe pour réaliser son Bilan Carbone® de l'année 2009.

Cette étude correspond à l'évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à l'électricité produite à partir d'un parc éolien de 100 MW comprenant trente-trois éoliennes Vestas V112 – 3.0 MW sur un cycle de vie complet.

L'année de référence pour cette étude est 2009. Bien que l'éolienne Vestas V112 – 3.0 MW ne soit pas entrée en pleine production en 2009, cette année a été choisie comme étant la plus représentative pour un débit annuel de turbines.

6.4.2. Le cycle de vie du parc éolien

Le cycle de vie du parc éolien a été modélisé en utilisant une approche modulaire correspondant aux étapes du cycle de vie des éoliennes Vestas V112 – 3.0 MW. Cela permet aux différents stades du cycle de vie du parc éolien d'être analysés séparément.

Fabrication

Cette phase comprend la production de matières premières et la fabrication de composants de centrales éoliennes tels que les fondations, les tours, les nacelles, les pales, les câbles et la station de transformateur. Le transport de matières premières comme l'acier, le cuivre, etc. ne sont pas inclus dans le cadre de cette étude.

Mise en place du parc éolien

Cette phase comprend : le transport des composants de l'éolienne sur le site, les travaux de construction sur le site tels que l'aménagement des pistes, des zones de travail et des virages. Les processus associés au creusement des fondations, à l'élévation des éoliennes, à la pose de câbles internes, à l'installation / montage du poste de transformation et au raccordement au réseau existant n'ont pas été inclus dans la présente étude.

Opérations sur site

Cette phase inclut le fonctionnement général du parc éolien et sa production d'électricité, ainsi que les activités de maintenance comme les changements d'huile, la lubrification et la rénovation ou le remplacement des pièces usées (par exemple, la boîte de vitesses) au cours de la durée de vie de l'éolienne.

Fin de vie

En fin d'exploitation, les composants des éoliennes sont démontés et le site remis en état. La gestion des déchets issus de cette phase est prise en compte dans l'étude (recyclage, incinération, etc.).

6.4.3. Hypothèses

Durée de vie des éoliennes

La durée de vie des éoliennes est supposée être de 20 ans. Cela correspond à la durée de vie de conception de la turbine V112 – 3.0 MW et s'applique à tous les composants de l'éolienne, excepté certaines pièces de rechange. Toutefois, comme l'industrie éolienne est encore relativement jeune (démarrage en 1979), la durée de vie réelle d'une centrale éolienne est assez incertaine. Par exemple, Vestas a une connaissance directe d'un certain nombre de ses éoliennes dépassant la durée de vie prévue de 20 ans. Les effets de la variation de la durée de vie d'une centrale éolienne sur les impacts environnementaux sont abordés dans le bilan carbone de l'éolienne V112 – 3.0 MW.

Matériaux d'entrée

Au moment où cette étude a été réalisée, il n'a pas été possible d'obtenir des données fiables sur le degré de contenu recyclé des matériaux utilisés lors de la conception des éoliennes. Il a donc été supposé que tous les matériaux entrant dans le système de production proviennent de matériaux vierges. Il s'agit d'une hypothèse très prudente car il est certain qu'une proportion plus ou moins importante des éléments métalliques provient effectivement de sources secondaires.

Fin de vie

Le traitement après exploitation de l'éolienne est complet et détaillé. Il est supposé que l'ensemble de l'éolienne est collecté à la fin de vie. Cependant, toute la turbine n'est pas recyclée de manière homogène, ce qui est expliqué plus en détail ci-dessous.

Tous les composants métalliques de grande taille, qui sont principalement mono-matériaux (engrenages, transformateurs, sections de la tour, etc.) sont supposés être recyclés à 98%. Les câbles sont recyclés à 95% et les autres éléments de la turbine sont traités comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 34 : Taux de recyclage des différents matériaux (Source : Vestas)

Matériaux	Traitement
Aluminium	Recyclé à 90% + 10% mis en décharge
Cuivre	Recyclé à 90% + 10% mis en décharge
Acier	Recyclé à 90% + 10% mis en décharge
Polymères	50 % incinéré + 50% mis en décharge
Lubrifiants	100% incinéré
Autres déchets (y compris le béton)	100% mis en décharge

Vestas a calculé le taux de recyclage moyen de composants d'une éolienne V112 – 3.0 MW à environ 81%.

Fondations

Il existe deux types de base de fondations pour les éoliennes onshore, en fonction du niveau des eaux souterraines. Les fondations adaptées au cas des eaux souterraines à faible niveau ont été choisies comme le cas de base car il est représentatif de la majorité des sites de parcs éoliens.

Transport

Les étapes de transport associées à l'acheminement des éléments de l'éolienne sur le site sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 35 : Hypothèses du bilan carbone pour le transport (Source : Vestas)

Composant	Transport
Nacelle	1 000 km par camion
Moyeu	1 000 km par camion
Pales	1 000 km par camion
Tour	700 km par camion
Fondation	200 km par camion

Le transport de l'équipe de maintenance jusqu'au site et les déplacements pendant les opérations de maintenance est estimé à 900 km par éolienne par année.

Unité fonctionnelle

Il est important de pouvoir comparer les impacts environnementaux potentiels associés à la production d'électricité à partir d'un parc éolien, avec d'autres formes de production d'électricité. Cependant, avec l'énergie éolienne, les conditions de vent sur le site sont des facteurs supplémentaires qui contribuent de manière significative à la production d'électricité.

L'éolienne V112 – 3.0 MW a été conçue pour fonctionner dans des conditions de vent faible à moyen (IEC II et III). Pour cette étude, les conditions de vent moyen ont été retenues comme le scénario de base car Vestas prévoit d'implanter ces machines sur des sites à vent moyen.

L'unité fonctionnelle pour l'étude ACV est définie comme suit:

1 kWh d'électricité fournie au réseau par une installation d'éoliennes dans des conditions moyennes de vent (IEC II).

6.4.4. Evaluation des impacts par catégorie et mesures pertinentes

La sélection des catégories d'impacts dans cette étude est basée sur les domaines prioritaires identifiés dans la stratégie de développement durable de la société Vestas. Les indicateurs clés de performance de la stratégie de développement durable qui ont été évaluées dans le cadre de cette ACV sont les suivantes:

- Epuisement des ressources abiotiques (éléments ADP) ;
- Epuisement des ressources abiotiques (fossiles ADP) ;
- Potentiel d'acidification ;
- Potentiel d'eutrophisation ;
- Potentiel de l'écotoxicité aquatique d'eau douce ;
- Potentiel de réchauffement global ;
- Potentiel de toxicité de l'homme ;
- Potentiel maritime de l'écotoxicité aquatique ;
- Potentiel de création d'ozone photochimique ;
- Energie primaire à partir de matières premières renouvelables (pouvoir calorifique inférieur) ;
- Energie primaire à partir de ressources (cal net. valeur) ;
- Potentiel d'écotoxicité terrestre ;
- Ecotoxicité ;
- Déchets à la décharge ;
- Consommation d'eau ;
- Taux de recyclage.

Ces indicateurs d'impact se concentrent sur ce qu'on appelle les « points médians » de la chaîne cause à effet. C'est-à-dire qu'ils associent des données d'émissions (les points de départ de la chaîne de cause à effet) à des impacts potentiels classés en différentes catégories (ex : réchauffement climatique, acidification, etc...). En tant que tels, les résultats des évaluations d'impact sont des expressions relatives et ne prévoient pas les incidences sur les différentes catégories (perte de biodiversité, réchauffement climatique, etc.).

Ces catégories d'impact peuvent correspondre à différentes échelles de représentation : de l'échelle de la planète (GWP=potentiel de réchauffement global) à une échelle régionale (AP=potentiel d'acidification) voire locale (EP=potentiel d'eutrophisation, etc.). La pertinence du point d'émission devient plus importante dès lors que des impacts locaux sont pris en compte.

6.4.5. Résultats

Matériaux nécessaires pour un parc éolien de 100 MW

Tableau 36 : Matériaux nécessaires pour la fabrication de 33 éoliennes V112 – 3,0 (Source : Vestas)

Matériaux	Poids (tonnes)
Acier et fer	10 254
Aluminium et alliages d'aluminium	113
Cuivre, alliages de cuivre et zinc	160,31
Matériaux polymères (thermoplastiques, élastomères, duromères,...)	693
Laques, adhésifs, étanchéité	25,24
Matériaux organiques, matériaux composés	897
Composants électriques	79
Huiles et lubrifiants	42,24
TOTAL	environ 12 263 tonnes

Tableau 37 : Matériaux nécessaires pour les fondations des 33 éoliennes V112 – 3,0 (Source : Vestas)

Matériaux	Poids (tonnes)
Acier et fer	1 491
Thermoplastiques	3
Béton et mortier	29 770
TOTAL	environ 31 264 tonnes

Tableau 38 : Matériaux nécessaires pour le câblage interne des 33 éoliennes V112 – 3,0 (Source : Vestas)

Matériaux	Poids (tonnes)
Aluminium et alliages d'aluminium	20
Cuivre	12
Thermoplastique	18
TOTAL	environ 50 tonnes

Tableau 39 : Matériaux nécessaires pour le raccordement des 33 éoliennes V112 – 3,0 au réseau local (Source : Vestas)

Matériaux	Poids (tonnes)
Acier et fer	14
Aluminium et alliages d'aluminium	75
TOTAL	environ 89 tonnes

Évaluation des impacts

La figure ci-dessous montre la contribution des différents composants et des différentes étapes du cycle de vie de l'éolienne Vestas V112 – 3 MW (à l'exception de la fin de vie de l'éolienne, car, à la différence des autres paramètres, le recyclage des matériaux compense une partie des impacts environnementaux) pour chaque catégorie d'impact retenue initialement.

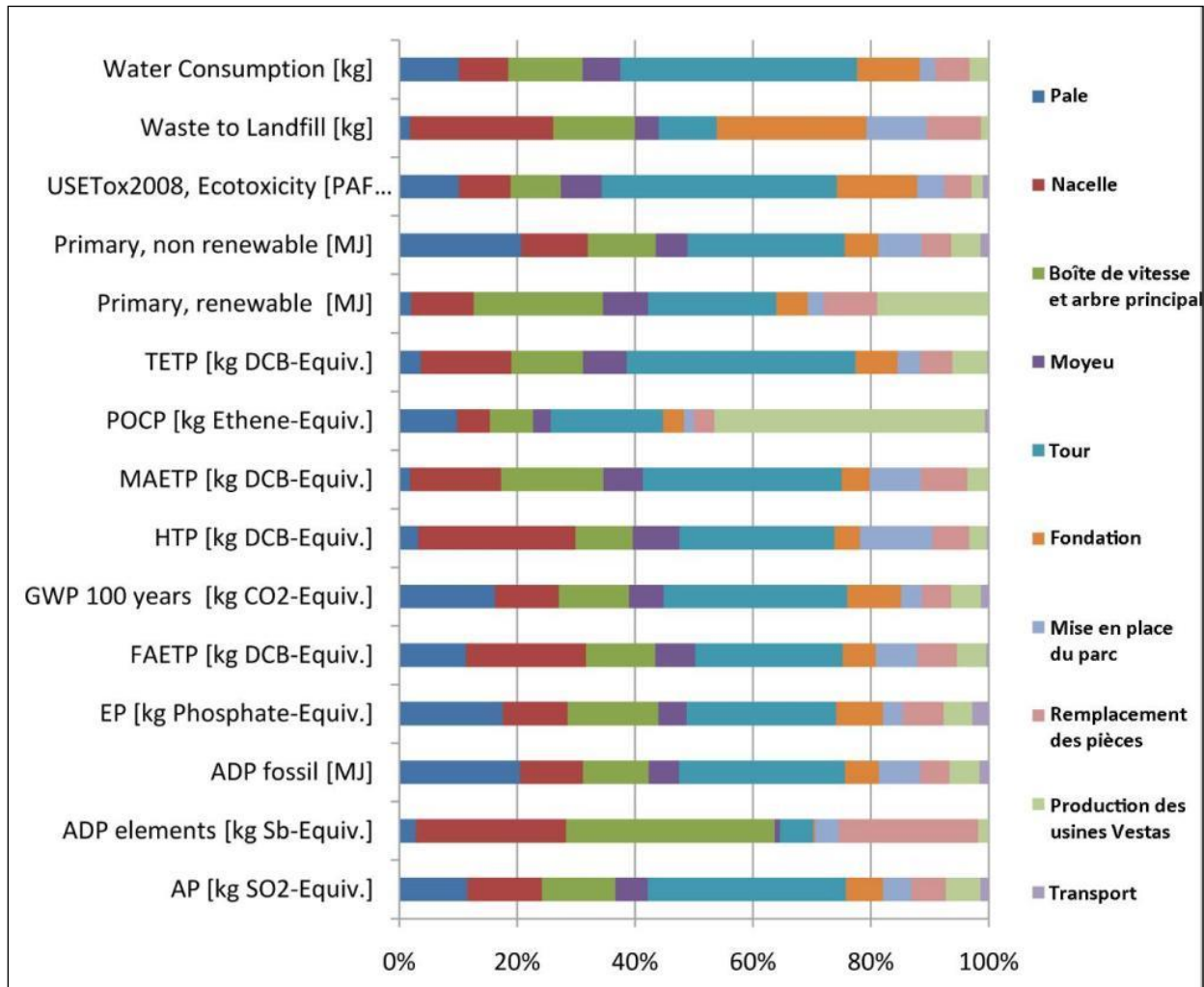


Figure 39 : Contribution des différents composants sur les catégories d'impacts retenus

Dans l'ensemble, la fabrication des tours a la plus grande contribution sur les différentes catégories d'impacts (part la plus significative pour douze des quinze catégories d'impacts). Pour les déchets à la décharge (*waste to landfill*), les fondations ainsi que la production de composants de nacelles sont responsables de la majorité des impacts. Dans le cas des éléments de d'épuisement de ressources abiotiques (*ADP elements*), c'est la production des composants de l'arbre principal et de la boîte de vitesse qui a les plus forts impacts. Globalement, le transport n'a pas de contribution significative sur les différentes catégories d'impacts couverts par cette étude.

Taux de recyclage

Le taux de recyclage moyen des éoliennes Vestas V112 – 3.0 MW a été estimé à 81%. Le tableau ci-dessous est spécifique à la turbine elle-même et ne comprend pas les fondations, les opérations sur site et d'autres composants de l'éolienne. Il montre le taux de recyclage de chacun des principaux éléments de l'éolienne à savoir : la nacelle, le rotor et la tour.

Tableau 40 : Taux de recyclage des éoliennes V112-3,0 (Source : Vestas)

Nacelle		Taux de recyclage	Rotor		Taux de recyclage
<i>Boîte de vitesse</i>			<i>Pales</i>		
	acier et fer	99 %		polymères	40 %
	métaux non-ferreux	<1 %		verre, céramique	52 %
	polymères	<1 %		autres	8 %
		<1 %			
<i>Transformateur</i>			<i>Moyeu</i>		
	acier et fer	82 %		acier et fer	95 %
	métaux non-ferreux	10 %		métaux non-ferreux	<1 %
	polymères	8 %		polymères	2 %
				autres	3 %
<i>Générateur</i>			Taux de recyclage du rotor		32 %
	acier et fer	85 %	<i>Tour</i>		Taux de recyclage
	métaux non-ferreux	9 %		acier et fer	99 %
	polymères	<1 %		métaux non-ferreux	<1 %
	électronique	3 %		autres	<1 %
	autres	3 %	Taux de recyclage de la tour		97 %
<i>Reste</i>					
	acier et fer	80 %			
	métaux non-ferreux	10 %			
	polymères	1 %			
	électronique	3 %			
	autres	6 %			
Taux de recyclage de la nacelle		82 %			

La part élevée des métaux recyclés participent pour une part importante au recyclage global de l'éolienne Vestas V112 – 3.0 MW.

Energie éolienne et réseau électrique conventionnel

Un aspect intéressant à considérer lors de l'évaluation des performances environnementales du parc éolien est le moment après lequel les charges environnementales de la production de la centrale éolienne sont compensées par les avantages environnementaux de l'énergie renouvelable qui est générée.

Dans l'analyse des cycles de vie de l'éolienne Vestas, un bilan énergétique a été calculé montrant la relation entre l'énergie requise pour le cycle de vie du parc éolien et la puissance de celui-ci. Selon cette approche, le temps mort, après quoi la production d'énergie dépasse les charges environnementales nécessaires au cycle de vie de l'éolienne V112 – 3.0 MW est de **8 mois**.

6.4.6. Interprétation

Les résultats mis en évidence dans cette étude montrent le profil environnemental de la production d'électricité d'un parc éolien de 100 MW composé de trente-trois éoliennes Vestas V112 – 3.0 MW.

Dans l'ensemble, les résultats montrent que pour chaque catégorie d'impact évalué les impacts les plus importants sont associés à la production des matières premières et à la phase de fabrication des composants de l'éolienne. Dans la plupart des cas, ils sont bien supérieurs aux impacts que l'on retrouve ailleurs dans le cycle de vie complet du parc éolien.

Dans la phase de fabrication c'est la tour elle-même qui représente généralement les plus forts impacts, du fait de la grande quantité d'acier nécessaire à sa production. La fabrication de la nacelle, de la boîte de vitesse et de l'arbre principal entraîne également des impacts significatifs. La fabrication des pales de la turbine a également des impacts importants, tandis que la production des autres parties de l'éolienne est généralement moins significative.

Le processus de fin de vie de l'éolienne a également des impacts significatifs qui sont compensés par le taux de recyclage élevé des éoliennes Vestas V112 – 3.0 MW.

La phase de transport des différents composants de l'éolienne sur le site apportent une contribution très faible aux impacts globaux du cycle de vie de l'éolienne.