

IV.2.6 Le fonctionnement de l'installation

Le fonctionnement des éoliennes Nordex N117/3600 TS91 repose sur les éléments suivants.

Éléments de l'installation	Fonctions	Caractéristiques
Fondation	Ancrer et stabiliser l'éolienne dans le sol	Cf. Tableau 3 : Les dimensions envisagées des aménagements du parc éolien
Mât	Supporter la nacelle et le rotor	Hauteur du mât de 90,9 m
Nacelle	Supporter le rotor Abriter le dispositif de conversion de l'énergie mécanique en électricité (génératrice, etc.) ainsi que les dispositifs de contrôle et de sécurité	
Rotor / pales	Capter l'énergie mécanique du vent et la transmettre à la génératrice	Pales d'une longueur de 58,4 m soit un rotor de 116,8 m de diamètre
Transformateur	Élever la tension de sortie de la génératrice avant l'acheminement du courant électrique par le réseau	

Tableau 4 : La description des éléments constitutifs de l'éolienne retenue

Les tensions électriques de l'installation sont les suivantes :

- nacelle : 660 V ;
- transformateur au pied de l'éolienne : 690 V en entrée et 20 000 V en sortie ;
- câbles inter-éoliennes et éoliennes-poste de livraisons : 20 000 V ;
- poste de livraison : 20 000 V ;
- câbles poste de livraison-poste source : 20 000 V.



Carte 3 : Le plan détaillé des installations

Le projet respecte une interdistance inter-éoliennes de 350 m environ, et répond sur ce critère parfaitement aux recommandations formulées dans le cadre de l'état initial paysager et patrimonial.

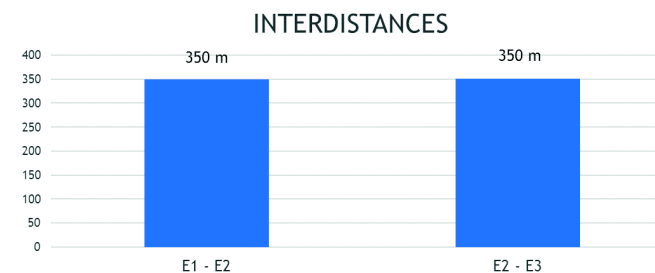


Figure 6 : Les interdistances inter-éoliennes prévues dans le cadre du projet

L'éolienne Nordex N117/3600 est une éolienne à régime variable avec un rotor d'un diamètre de 116,8 m et une puissance nominale de 3 600 kW. Le mât, la nacelle et les pales du rotor sont conçus et certifiés selon les normes nationales et internationales sur les éoliennes. Elle existe en variantes pour 50 Hz et 60 Hz. La machine et les pales sont prévues pour la classe 3a selon la norme CEI 61400-1 ; elle bénéficie de la certification DIN ISO 9001 couvrant la planification, la fourniture, la construction et le démarrage de tous les systèmes électriques et automatiques ainsi que des activités d'infrastructure liées au vent des systèmes d'énergie et de parcs éoliens et est conforme aux dispositions de la norme NF EN 61 400-1 dans sa version de juin 2006 ou CEI 61 400-1 dans sa version de 2005.

Elle répond aux exigences de l'arrêté ministériel du 26 août 2011 relatif aux installations soumises à autorisation au titre de la rubrique 2980 des installations classées relatives à la sécurité de l'installation.

IV.2.6.1 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

La nacelle avec le rotor est logée sur le mât via un dispositif pivotant. Son orientation est adaptée automatiquement à la direction du vent par le système contrôle-commande à l'aide du système d'orientation. Le rotor est contre le vent.

La transformation de l'énergie du vent en énergie électrique a lieu par une génératrice asynchrone à double alimentation. Son stator est directement relié au réseau du parc éolien, son rotor l'est via un convertisseur de fréquence à commande spéciale. Cela présente l'avantage considérable que, d'une part, le convertisseur de fréquence ne doit être conçu que pour env. 30 % de la puissance de la génératrice et, d'autre part, que la génératrice peut fonctionner dans une certaine plage de vitesse de rotation autour de sa vitesse de rotation synchrone.

La limitation de puissance a lieu en modifiant l'angle de calage des pales. Le système à pas variable consiste en trois commandes et entraînements indépendants, un pour chaque pale. La structure porteuse de la nacelle est composée d'un châssis machine coulé, d'un châssis générateur soudé et d'une structure porteuse métallique comme voie de roulement pour la grue de bord. La structure porteuse métallique a également pour fonction l'accueil du revêtement de la nacelle. Celui-ci est constitué de plastique renforcé de fibres de verre.

L'espace intérieur est conçu avec assez d'espace pour pouvoir effectuer tous les travaux avec le toit fermé. Il y a plusieurs écoutilles donnant accès au moyeu du rotor ou aux structures du toit. Sur le toit se trouve le système anémométrique redondant et, en option, les feux de balisage de nuit et de jour.

Les données telles que la direction et la vitesse du vent sont mesurées en continu pour adapter le mode de fonctionnement de l'éolienne en conséquence. La commande d'orientation de l'éolienne commence à fonctionner même en dessous de la vitesse de démarrage.

La direction du vent est mesurée en continu par la girouette. Si la déviation entre l'axe du rotor et la direction mesurée du vent est trop grande, la position de la nacelle est corrigée par la commande d'orientation. L'ampleur de la rotation et le temps imparti avant que la nacelle ne soit mise dans la bonne position dépendent de la vitesse du vent.

Si l'éolienne a été arrêtée manuellement ou par son système de commande, les pales sont mises progressivement en position drapeau, réduisant la surface utile des pales exposée au vent. L'éolienne continue de tourner et passe progressivement en fonctionnement au ralenti.

IV.2.6.2 Le mât

Les coupes suivantes, à travers la section inférieure du mât, montrent schématiquement les composants les plus importants du pied du mât.

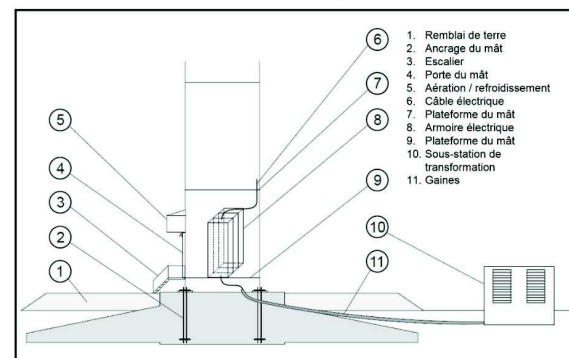


Figure 7 : La coupe à travers le pied du mât, solution avec sous-station de transformation séparée

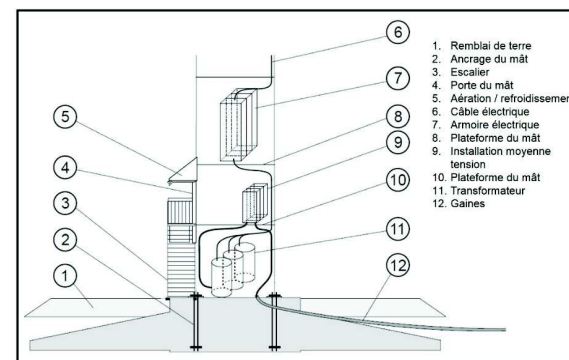


Figure 8 : La coupe à travers le pied du mât, solution avec sous-station de transformation intégrée

C'est la solution avec sous-station de transformation intégrée qui a été retenue.

IV.2.6.3 Le rotor

L'énergie cinétique du vent est transmise par les pales au train d'entraînement via le moyeu du rotor. L'énergie du vent est transformée en mouvement de rotation. Ce diamètre de rotor d'environ 117 m fait de la N117/3600 la candidate optimale pour les sites à l'intérieur des terres.

Le rotor est composé de trois pales, d'un moyeu, de trois raccords rotatifs et de trois entraînements d'orientation de pale pour la variation de pas des pales. Les pales sont fabriquées en construction mixte de plastique renforcé de fibres de verre et de fibres de carbone (PRFV et PRFC). Les pales du rotor sont équipées d'un système de protection contre la foudre composé de plusieurs récepteurs de foudre déviant la foudre vers le moyeu.

Le choix a été fait d'intégrer sur les pâles des serrations (peignes situés au dernier tiers extérieur des pâles), ceci permettra de limiter l'émergence de bruit des machines et donc de limiter l'impact acoustique des riverains.

Le système à pas déplace les pales du rotor dans les positions définies par la commande. Chaque pale est commandée

et entraînée séparément. Le système à pas est le frein principal de l'éolienne. Les pales se tournent de 90° pour le freinage, ce qui interrompt la portance et crée une grande résistance de l'air provoquant ainsi le freinage du rotor (frein aérodynamique).



Figure 9 : L'accès dans le moyeu du rotor

IV.2.6.4 La nacelle

L'éolienne possède un dispositif de mesure mixte installé sur le dessus de la nacelle, composé :

- d'une girouette qui relève la direction du vent,
- d'un anémomètre qui mesure la vitesse.

Le palier d'orientation de la nacelle, muni d'une couronne, est monté directement sur la connexion supérieure de la tour. Il permet la rotation de l'éolienne et ainsi de l'orienter face au vent. Les moteurs équipés de roues dentées (« moteurs d'orientation » ou moteurs de « Yaw ») s'engagent dans la couronne pour faire tourner la nacelle et l'orienter en fonction du vent.

Le poids de la nacelle est absorbé par le mât, par l'intermédiaire du palier d'orientation. Le support principal est fixé directement sur le palier d'orientation.

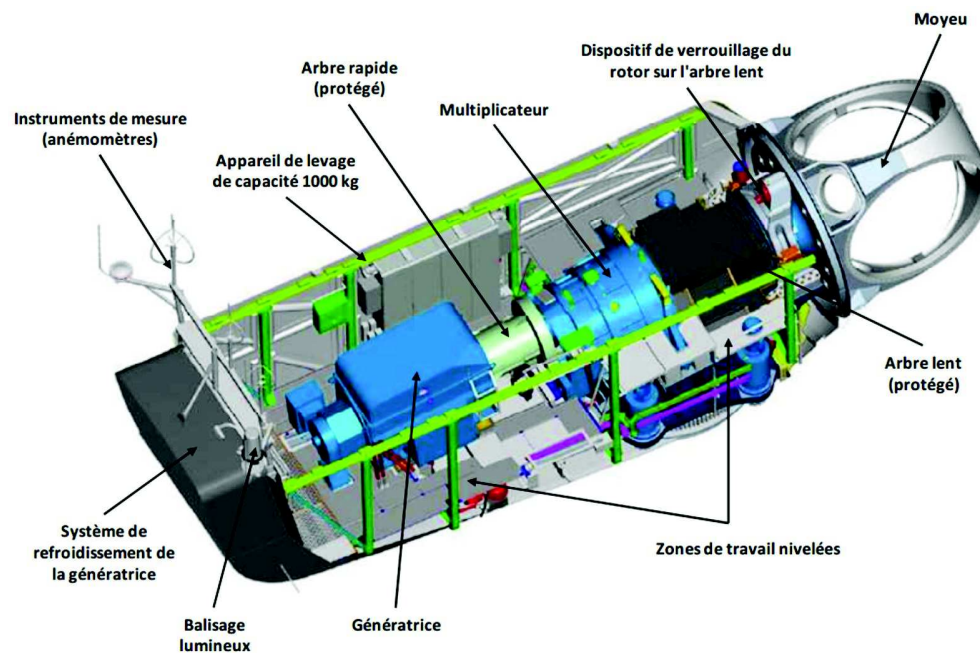


Figure 10 : Le dessin schématique de la nacelle (source : NORDEX)

La commande d'orientation de l'éolienne commence à fonctionner même lorsque la vitesse du vent est faible. Même à l'arrêt, en raison, par exemple, d'une trop grande vitesse du vent, l'éolienne est tournée face au vent.

Le processus d'orientation est déterminé par le décompte des rotations du moteur d'inclinaison. Si le système de commande détecte des anomalies dans la commande d'orientation ou le vrillage des câbles, il déclenche une procédure d'arrêt.

IV.2.6.5 Le train d'entraînement

Le train d'entraînement transmet le mouvement de rotation du rotor à la génératrice. La vitesse de rotation est augmentée à la valeur nécessaire. Le train d'entraînement est constitué des composants principaux suivants :

- l'arbre du rotor ;
- le multiplicateur. L'arbre de rotor et le multiplicateur sont reliés entre eux par une frette de serrage ;
- le coupleur ;
- la génératrice.

L'arbre du rotor

L'arbre rotor est situé dans le palier du rotor de la nacelle. Le palier du rotor transmet les forces radiales et axiales du rotor au châssis machine. Le palier du rotor contient un dispositif de blocage hydraulique du rotor. La bague collectrice pour la transmission de signal et de tension est intégrée dans l'arbre de rotor.

Le multiplicateur

Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation au niveau nécessaire pour la génératrice. Le système de refroidissement consiste en un circuit huile / air à capacité de refroidissement graduelle. Les roulements et denture d'engrenage sont constamment lubrifiés par de l'huile refroidie. L'huile du multiplicateur assure non seulement la lubrification mais aussi le refroidissement. La température des roulements et de l'huile est surveillée en permanence.

Le coupleur

Le coupleur se trouve entre le disque de frein sur le multiplicateur et la génératrice. Il a le devoir de compenser les décalages entre multiplicateur et génératrice. Une protection antisurcharge (limitation prédéfinie de couple) est montée sur l'arbre de la génératrice. Elle empêche la transmission de pics de couple qui peuvent avoir lieu dans la génératrice en cas de problèmes de réseau. Le coupleur est isolé électriquement.

La génératrice

Le générateur est une génératrice asynchrone à double alimentation. Elle est maintenue à une température de fonctionnement optimale grâce au circuit de refroidissement. La génératrice est refroidie avec un liquide de refroidissement.

IV.2.6.6 L'unité d'alimentation au réseau

Il y a deux réseaux basse tension dans l'éolienne. Le réseau de 660 V transporte le courant produit vers le point d'entrée du réseau d'alimentation, via le transformateur moyenne tension. Le réseau à 400 V alimente tous les systèmes électriques de l'éolienne. Le réseau basse-tension de la génératrice (660 V) est un réseau isolé sans conducteurs neutres (réseau IT) et le réseau basse-tension pour besoins propres (400 V) un réseau TN-S. Un système de surveillance de l'isolation fait office de dispositif de protection.

Un transformateur moyenne-tension et une installation de commutation moyenne tension sont nécessaires pour raccorder chaque éolienne au réseau moyenne tension. Le point de raccordement vers le réseau d'alimentation est créé par une station moyenne tension. Selon le nombre d'éoliennes, des sous-stations supplémentaires sont montées sur les éoliennes et reliées entre elles au niveau de tension correspondant au réseau d'alimentation. L'équipement de mesure nécessaire, convertisseur compris, doit aussi être fait conformément aux conditions de raccordement locales et représente la limite de propriété dans le poste de transfert. L'équipement du poste de transfert et la réalisation technique du point de remise dépendent du projet. Si Nordex est chargée de la réalisation, l'équipement et la réalisation du poste de transfert sont déterminés avec l'exploitant du réseau. Si le transformateur est installé dans le mât (= option), un transformateur à sec sera utilisé.

En cas de sous-station de transformation externe, on utilise en général un transformateur à bain d'huile. Les données techniques du transformateur et l'installation de commutation moyenne tension peuvent être différentes en fonction du fabricant, du niveau de tension requis et des conditions environnantes.

L'alimentation en énergie électrique des éoliennes est normalement envoyée vers le réseau moyenne-tension de l'exploitant du réseau. Si les conditions du réseau sont inadéquates ou en cas de puissance d'alimentation élevée, il peut être nécessaire d'intégrer au réseau haute tension, ce qui rend nécessaire de construire une sous-station de transformation. Le couplage réseau de l'éolienne s'effectue à l'aide d'un convertisseur IGBT selon le principe de la génératrice asynchrone à double alimentation. La compensation de courant réactif (réglage $\cos\phi$) peut être définie librement par sélection de paramètre avec le convertisseur IGBT, dans certaines conditions, dans une certaine gamme. Avec ce système, les courants de commutation lors du raccordement au réseau peuvent être établis avec un ordre de grandeur de 1, c'est-à-dire que le raccordement au réseau a lieu de manière absolument synchronisée et sans pics. L'éolienne peut aussi être équipée d'un paquet de raccordement au réseau étendu.

IV.2.6.7 La certification des éoliennes

La société Nordex est certifiée ISO 9001. Le système de management de la qualité et tous les processus de production sont conformes à la norme ISO 9001.

Les éoliennes Nordex sont conçues, fabriquées, installées et certifiées selon les exigences de la norme IEC 61400.

IV.2.6.8 Les caractéristiques techniques des aérogénérateurs

Le fonctionnement de l'éolienne

La principale tâche de la gestion de l'éolienne (ordinateur de gestion d'exploitation + logiciel Nordex Control 2) est de respecter continuellement les paramètres de l'éolienne pendant le fonctionnement. À cette fin est employée une commande en temps réel, qui relève et traite en continu les données pertinentes. Les paramètres sont prédéterminés par Nordex et adaptés à chaque site. Ceci permet de garantir le fonctionnement automatique et sûr de l'éolienne, quelle que soit la situation. Si la vitesse de mise en service n'est pas atteinte, l'éolienne reste en état de repos (mode économique), c'est-à-dire que seul l'ordinateur de gestion d'exploitation fonctionne et saisit les données (météorologiques). Les autres systèmes ne seront activés qu'en cas de besoin et ne gaspillent donc pas de courant.

Les seules exceptions sont les fonctions de sécurité, comme le système de freinage (pompe hydraulique). Le rotor tourne au ralenti. Si la vitesse de démarrage est atteinte, l'éolienne passe à l'état « prêt à démarrer ». Tous les systèmes sont maintenant soumis à un contrôle et la nacelle s'oriente en fonction du vent. Si la force du vent augmente, le rotor commence à tourner plus rapidement. Lorsque la vitesse de rotation déterminée est atteinte, la génératrice est raccordée au réseau et l'éolienne commence à produire de l'électricité. Pendant le fonctionnement, la nacelle suit la direction du vent. Si une certaine valeur limite d'entortillement des câbles est dépassée, l'éolienne est arrêtée et la nacelle retourne dans sa position initiale, c'est-à-dire que les câbles sont désentortillés. L'éolienne est ensuite automatiquement redémarrée.

Les spécifications techniques

En cas de vitesses de vent faibles, l'éolienne fonctionne en mode de charge partielle. Les pales sont maintenues dans le lit du vent de manière optimale, ce qui leur permet de fonctionner continuellement dans la meilleure aérodynamique et avec une efficacité maximale. La vitesse de rotation du rotor passe en dessous de la vitesse nominale. La puissance générée par l'éolienne dépend maintenant de la vitesse du vent. Lorsque la vitesse nominale du vent est atteinte, l'éolienne entre dans le fonctionnement de charge nominale. Si la vitesse du vent augmente, la commande modifie l'angle de calage des pales de manière que la vitesse de rotation du rotor soit maintenue constante à la vitesse de rotation nominale et que l'éolienne produise constamment sa puissance nominale. En cas de dépassement de la vitesse du vent de coupure, l'éolienne s'arrête : l'angle de calage des pales du rotor se fixe à environ 90°, c'est la mise en drapeau. Le rotor freine. Il se met au ralenti jusqu'à ce que la vitesse du vent soit redescendue en dessous de la vitesse du vent de redémarrage. Ainsi, les contraintes exercées sur l'éolienne en cas de gros temps sont considérablement réduites. Tous les systèmes et de nombreux composants de l'éolienne sont équipés de capteurs informant le système contrôle-commande de leur état. Des valeurs de consigne sont attribuées à chaque point de mesure (paramètres d'exploitation) ; celles-ci doivent être respectées. Si une valeur mesurée s'écarte de la valeur réelle, le système de contrôle-commande réagit en conséquence. Le dépassement de valeurs limites de température prédéterminées provoque par exemple en premier lieu la mise en service de la pompe du circuit de refroidissement. Lorsque la valeur de consigne prédéterminée est à nouveau atteinte, la pompe se remet hors circuit. Si la valeur limite supérieure est dépassée, un avertissement est envoyé à la télésurveillance. La télésurveillance Nordex détermine ce qu'il faut faire sur la base des données d'exploitation actuelles. Si la température redescend sous une valeur limite prédéterminée, l'avertissement est annulé. Si une troisième valeur limite est dépassée, l'éolienne s'arrête immédiatement. Cette troisième valeur limite est choisie de sorte que l'éolienne ne soit pas encore endommagée. Dans cet exemple, six valeurs limites sont affectées ainsi à un point de mesure de température, trois

valeurs limites de température supérieures et trois valeurs limites de température inférieures. En cas de dépassement de limites de fonctionnement de l'éolienne prédéterminées, l'éolienne s'arrête immédiatement, par ex. en cas de dépassement de la vitesse du vent de coupure ou en cas de chute de pression dans le système hydraulique. En cas de causes extérieures comme une vitesse du vent trop élevée ou une erreur de réseau, l'éolienne est freinée en douceur. En cas de causes liées à la sécurité, un freinage d'urgence est mis en oeuvre et le rotor est freiné le plus rapidement possible.

Les spécifications techniques

Les spécifications des éoliennes Nordex N117/3600 TS91 sont présentées dans le tableau et la figure suivants.

Type d'éolienne	Nordex N117/3600 TS91
Puissance nominale	3,6 MW
Diamètre du rotor	116,8 m
Hauteur du moyeu	90,9 m
Hauteur sommitale	149,6 m
Concept de l'installation	Avec boîte de vitesse, régime variable, ajustage individuel des pales
Type de rotor	Rotor face au vent avec système actif de réglage des pales
Sens de rotation	Sens des aiguilles d'une montre
Nombre de pales	3
Surface balayée	10 715 m ²
Matériau utilisé pour les pales	Fibre de verre (résine époxy), protection parafoudre intégrée
Option pour les pales	Ajout de serrations (peignes) sur les pales permettant de réduire l'émergence de bruit
Vitesse de rotation	Variable de 7,9 à 14,1 tours/min
Système de réglage des pales	Ajustage individuel des pales, système autonome d'ajustage par pale du rotor, avec alimentation de secours séparée
Moyeu	Fixe
Palier principal	Roulement à rotule sur rouleaux
Système de freinage	Le frein aérodynamique est réalisé à l'aide de trois pales commandées indépendamment et de manière redondante et pouvant pivoter de 90° autour de leur axe longitudinal De plus, l'éolienne est équipée d'un frein mécanique. Ce frein soutient le frein dynamique dès qu'un régime défini n'est plus atteint et ralentit le rotor jusqu'à l'arrêt
Vitesse du vent de coupure	25 m/s
Surveillance à distance	La commande de l'éolienne a lieu par un ordinateur de gestion et le logiciel Nordex Control 2

Tableau 5 : Les spécifications techniques des éoliennes Nordex N117/3600 (source : Nordex)