

# **Etude du potentiel éolien - Repowering du parc éolien de Perwez**

***Rapport final***

**Client : Eneco**

## Version(s)

---

| NUMÉRO | DATE       | AUTEUR                              | MODIFICATIONS  |
|--------|------------|-------------------------------------|--|
| 1.1    | 23/05/2019 | Loïc Houtart<br>Pierre-Antoine Mali |  |
| 2.1    | 19/06/2019 | Loïc Houtart<br>Pierre-Antoine Mali | <ul style="list-style-type: none"><li>- Prise en compte des projets autorisés.</li><li>- Impact du repowering sur les projets existants et autorisés</li></ul> |
| 2..2   | 26/06/2019 | Pierre-Antoine Mali                 | <ul style="list-style-type: none"><li>- Prise en compte de la capacité d'injection maximale au poste de raccordement</li></ul>                                 |
|        |            |                                     |  |
|        |            |                                     |  |

## Table des matières

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SYNTHÈSE DES RÉSULTATS .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2. MÉTHODOLOGIE.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>3. DONNÉES UTILISÉES.....</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1. <i>Le projet.....</i>   | <i>7</i>  |
| 3.2. <i>Les éoliennes .....</i>  | <i>9</i>  |
| 3.3. <i>Les données de vent .....</i>  | <i>9</i>  |
| 3.4. <i>Le modèle d'écoulement du vent .....</i>   | <i>10</i> |
| 3.5. <i>Le modèle de terrain.....</i>  | <i>11</i> |
| <b>4. RÉSULTATS .....</b>  | <b>12</b> |
| 4.1. <i>Climat local de vent .....</i>   | <i>12</i> |
| 4.2. <i>Densité de l'air.....</i>  | <i>12</i> |
| 4.3. <i>Production électrique du projet.....</i>   | <i>13</i> |
| 4.4. <i>Pertes de production systématiques .....</i>   | <i>14</i> |
| 4.5. <i>Production électrique détaillée par éolienne sans bridage.....</i>                   | <i>15</i> |
| 4.6. <i>Pertes de production générées par les directives de bridages .....</i>               | <i>16</i> |
| 4.7. <i>Impact du repowering sur les projets voisins .....</i>                               | <i>17</i> |
| <b>5. CONCLUSIONS .....</b>  | <b>19</b> |
| A. <i>Bridage acoustique.....</i>  | <i>24</i> |
| B. <i>Module d'arrêt chauve-souris .....</i>   | <i>28</i> |
| C. <i>Module d'arrêt ombre portée .....</i>  | <i>31</i> |
| D. <i>Combinaison bridage acoustique + module d'arrêt chauve-souris + module ombre .....</i> | <i>33</i> |

## SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Tableau 1 Perspectives de production du projet de re-powering à Perwez

| MODÈLE D'ÉOLIENNES  | SENVION<br>4.2M140 | NORDEX<br>N131/3600 | SENVION<br>3.4M122<br>NES | SENVION<br>4.2M140 |
|---|--------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|
| Nombre d'éoliennes  | 7                  | 7                   | 7                         | 7                  |
| Diamètre du rotor (m)   | 140                | 131                 | 122                       | 140                |
| Hauteur d'axe (m)   | 110                | 114                 | 119                       | variable           |
| Puissance éolienne (MW)   | 4.2                | 3.6                 | 3.4                       | 4.2                |
| Puissance installée du parc (MW)  | 29.4               | 25.2                | 23.8                      | 29.4               |
| Production électrique P50 brute (MWh/an)  | 95482              | 86489               | 76239                     | 93307              |
| Pertes systématiques cumulées (%)   | 17.0               | 17.0                | 15.7                      | 17.2               |
| Production électrique P50 nette (MWh/an), Sans bridage                                    | 79235              | 71825               | 64273                     | 77242              |
| Facteur de charge (%)   | 30.7               | 32.5                | 30.8                      | 30.0               |
| Heures équivalent pleine charge (h)   | 2695               | 2850                | 2701                      | 2627               |
| <b>Avec bridage acoustique (conditions générales) :</b>                                   |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 74413              | 68788               | 60311                     | 72863              |
| Pertes bridage (%)  | 6.1%               | 4.2%                | 6.2%                      | 5.7%               |
| <b>Avec bridage acoustique (conditions sectorielles) :</b>                                |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 76277              | 69913               | 62277                     | 74472              |
| Pertes bridage (%)  | 3.7%               | 2.7%                | 3.1%                      | 3.6%               |
| <b>Avec module d'arrêt chauve-souris :</b>  |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 77263              | 70040               | 62745                     | 75250              |
| Pertes bridage (%)  | 2.5%               | 2.5%                | 2.4%                      | 2.6%               |
| <b>Avec module d'arrêt ombre :</b>  |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 79148              | 71745               | 64202                     | 77156              |
| Pertes bridage (%)  | 0.1%               | 0.1%                | 0.1%                      | 0.1%               |
| <b>Avec bridage cumulé (acoustique conditions générales + chauve-souris + ombre) :</b>    |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 72482              | 67005               | 58812                     | 70907              |
| Pertes bridage (%)  | 8.5%               | 6.7%                | 8.5%                      | 8.2%               |
| <b>Avec bridage cumulé (acoustique conditions sectorielles + chauve-souris + ombre) :</b> |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 74300              | 68102               | 60730                     | 72473              |
| Pertes bridage (%)  | 6.2%               | 5.2%                | 5.5%                      | 6.2%               |

## 1. INTRODUCTION

---

ENECO projette de remplacer les 8 éoliennes de son parc de Perwez par 7 nouvelles éoliennes. Le parc actuel de Perwez comporte 5 GE77 et 3 MD77, en service depuis mars 2005 et septembre 2006 respectivement.

La société GreenPlug a procédé à une étude indépendante du potentiel éolien du site dont les résultats sont consignés dans ce rapport. L'objectif de l'étude est d'évaluer la ressource en vent du site et la production électrique annuelle générée par le nouveau projet.

L'évaluation du potentiel éolien s'appuie sur le modèle d'écoulement du vent WAsP, sur les données de vent des stations météorologiques disponibles dans la région ainsi que sur les données de production des éoliennes en exploitation.

## 2. MÉTHODOLOGIE

L'évaluation du potentiel éolien repose sur la prévision du climat local de vent à hauteur de nacelle de chaque éolienne du parc. Les distributions des vitesses calculées sont ensuite combinées à la courbe de puissance de l'éolienne pour en calculer la production électrique brute.

Les pertes de production systématiques, incluant les pertes par effet de sillage, sont ensuite évaluées et déduites pour déterminer la production électrique nette de l'éolienne puis du parc. Les simulations de production ont été réalisées par défaut en tenant compte des éoliennes construites et autorisées à proximité du projet ; il s'agit d'une approche conservatrice puisque les pertes de production par effet de sillage sont maximales.

Dans le cadre de cette étude, la prévision du vent local s'appuie sur le modèle d'écoulement du vent WAsP et sur les données de vent des stations météorologiques disponibles dans la région.

Les principales étapes de la procédure d'évaluation sont schématisées à la figure suivante.



Le modèle WAsP permet d'extrapoler les données des stations météorologiques vers le site en tenant compte l'influence du relief, de la couverture de terrain et de la stabilité de l'atmosphère sur l'écoulement du vent.

La méthode d'évaluation du potentiel éolien à partir des stations météorologiques ainsi que la validation de cette méthode sont explicités en détail dans la note technique « Procédure d'évaluation du potentiel éolien – Note Méthodologique ». A l'issue des différents tests de validation réalisés, il ressort que cette méthode permet de prédire de façon fiable la production d'un parc éolien implanté en Région Wallonne.

Les données de production du parc éolien de Perwez ont également été utilisées pour contrôler les performances du modèle de calcul. Les résultats de cette validation complémentaire sont illustrés à l'annexe 3 du rapport.

### 3. DONNÉES UTILISÉES

#### 3.1. LE PROJET

Le projet de repowering prévoit la construction de 7 nouvelles éoliennes pour remplacer le parc construit de Perwez qui comprend 8 éoliennes (5 GE77 et 3 MD77) en service depuis 2005 et 2006. Ce site est localisé sur la commune de Perwez, au nord-est de la E411, et au nord de 8 éoliennes existantes (5 Vestas V90 et 3 Nordex N100).

Les 7 nouvelles éoliennes en projet de Perwez sont localisées sur la carte de la figure 1. Les coordonnées des éoliennes sont indiquées au tableau 2.

**Figure 1 : Localisation des 7 éoliennes du projet de repowering de Perwez (symboles rouges de 1 à 7)), des 8 éoliennes des parcs existants (symboles bleus de I à VIII), du projet autorisé à Aische (symbole bordeau A1) et du projet autorisé à Liernu (symboles verts de L1 à L6).**



**Tableau 2 Coordonnées des éoliennes du projet de repowering (Système de coordonnées : Lambert 72)**

| ÉOLIENNE N°  | COORDONNÉE X | COORDONNÉE Y |
|--|--------------|--------------|
| <b>EOLIENNES ENECO - PROJET REPOWERING</b>                           |              |              |
| 1  | 179622       | 145142       |
| 2  | 180050       | 144856       |
| 3  | 180527       | 144393       |
| 4  | 179416       | 144604       |
| 5  | 179738       | 144285       |
| 6  | 180119       | 143876       |
| 7  | 180553       | 143771       |
| <b>EOLIENNES ASPIRAVI - EOLIENNES EXISTANTES À L'OUEST DE L'E411</b> |              |              |
| I  | 178,970      | 144,158      |
| II   | 179,213      | 143,882      |
| III  | 179,454      | 143,599      |
| IV   | 179,892      | 142,879      |
| V  | 180,070      | 142,391      |
| <b>EOLIENNES ENECO 2 - EOLIENNES EXISTANTES AU SUD DU PARC</b>       |              |              |
| VI   | 180,941      | 143,529      |
| VII  | 180,561      | 142,985      |
| VIII   | 180,299      | 143,313      |
| <b>EOLIENNE AISCHE - EOLIENNE AUTORISÉE</b>                          |              |              |
| A1   | 179,934      | 143,474      |
| <b>EOLIENNES LIERNU - ÉOLIENNES AUTORISÉES</b>                       |              |              |
| L1   | 180,783      | 142,622      |
| L2   | 181,042      | 142,183      |
| L3   | 181,302      | 141,744      |
| L4   | 181,311      | 143,078      |
| L5   | 181,473      | 142,630      |
| L6   | 181,815      | 142,020      |

### 3.2. LES ÉOLIENNES

Les modèles d'éolienne sélectionnés par le client pour son projet de repowering sont indiqués au tableau 3.

**Tableau 3 Modèles et spécifications techniques des éoliennes étudiées**

| MODÈLE D'ÉOLIENNE          | SENVION 4.2M140                                      | NORDEX N131/3600                                     | SENVION 3.4M122                                     | SENVION 4.2M140                                      |
|----------------------------|--|--|---|--|
| Diamètre du rotor (m)      | 140  | 131  | 122   | 140  |
| Hauteur de mât (m)         | 110  | 114  | 119   | Variable   |
| Puissance éolienne (kW)    | 4200   | 3600   | 3400  | 4200   |
| Vitesse de démarrage (m/s) | 3  | 3  | 3   | 3  |
| Vitesse coupure (m/s)      | 26   | 25   | 22  | 26   |
| Courbe de puissance        | Calculée par le constructeur (11/04/2018), en BT (*) | Calculée par le constructeur (21/11/2018), en BT (*) | Calculée par le constructeur (22/10/2018), en BT(*) | Calculée par le constructeur (11/04/2018), en BT (*) |

(\*) BT : Basse tension (avant transformateur éolienne), HT : Haute tension (après transformateur)

Les courbes de puissance des éoliennes fournies par les constructeurs, pour une densité de l'air de 1.225 kg/m<sup>3</sup>, sont reprises à l'annexe 1. Les courbes de puissances ont été ajustées dans les calculs de production pour tenir compte de la densité de l'air calculée sur le site.

Les éoliennes existantes de Perwez qui ne font pas partie du projet de repowering d'Eneco sont des Vestas V90 (celles d'Aspiravi numérotées de I à V) et des Nordex N100 (celle d'Eneco au sud du parc en repowering, numérotées de VI à VIII) sur des mâts de 105m et 100m respectivement.

Des projets autorisés à Aische (A1) et Liernu (L1 à L6) ont également été pris en compte. Ces projets comptabilisent un total de 1 et 6 éoliennes respectivement. Les modèles de ces projets sont des Nordex N100 – 150m – 2.5MW.

### 3.3. LES DONNÉES DE VENT

Les données de vent alimentant le modèle WAsP proviennent des stations météorologiques synoptiques opérées par l'IRM et Meteo WING sur le territoire Belge.

La sélection des données météorologiques a été réalisée en tenant compte de :

- La disponibilité des données : taux de recouvrement des données de minimum 90 % sur une période de 10 années.
- La cohérence et la stabilité des données dans le temps ; analyse de l'historique des stations, analyse du taux de couverture/ disponibilité des données, analyse et comparaison des tendances entre les séries de données.
- L'environnement du mât de mesures ; seules les stations de classe 1, la plus exigeante en terme de dégagement par rapport aux obstacles environnants, ont été sélectionnées. La classification des stations a été réalisée par l'IRM.

- La représentativité des données : seules les stations répondant aux critères précédents et situées à moins de 100 km du site ont été retenues.

En appliquant les critères de sélection précédents, 5 stations météorologiques ont finalement été retenues pour cette étude. Un critère de pondération est attribué aux stations en fonction de la distance qui les sépare du site, en accordant un poids plus élevé aux stations les plus proches.

Les données de vent utilisées dans le cadre de cette étude sont résumées au tableau 4.

**Tableau 4 Inventaire des données météorologiques utilisées**

| NOM DE LA STATION | PÉRIODE DONNÉES | DONNÉES             | RÉSOLUTION TEMPORELLE DONNÉES | VITESSE MOYENNE (M/S) | HAUTEUR MESURES (M) | DISTANCE DU SITE (KM) |
|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Beauvechain       | 2001-2010       | Vitesse & Direction | Horaire                       | 3.9                   | 10                  | 17.1                  |
| Bierset           | 2001-2010       | Vitesse & Direction | Horaire                       | 4.1                   | 10                  | 47.1                  |
| Chièvres          | 2001-2010       | Vitesse & Direction | Horaire                       | 4.0                   | 10                  | 68.0                  |
| Elsenborn         | 2001-2010       | Vitesse & Direction | Horaire                       | 3.4                   | 10                  | 99.5                  |
| Florennes         | 2001-2010       | Vitesse & Direction | Horaire                       | 3.9                   | 10                  | 41.9                  |

Les données de vent utilisées sont récentes et ne remontent pas au-delà de 2001. Avant 2001, des modifications importantes ont affectés la plupart des stations météorologiques (déplacement du mat, remplacement des équipements, modification du format d'enregistrement des données). L'homogénéité des données avant 2001 ne pouvant être garantie, les données mesurées avant cette date ont systématiquement été écartées.

La représentativité de la période retenue (2001-2010) par rapport aux trente dernières années (1984-2015) a été analysée en comparant les index de vent de ces deux périodes. Un index de vent indique, en pourcent, le niveau de production d'une éolienne sur une période donnée par rapport à une période de référence. L'index de vent est calculé à partir des données de vent MERRA issues d'un modèle météorologique stable sur les 30 dernières années. L'index de vent moyen pour la Belgique calculé sur la période 2001-2010 s'élève à 99 contre 100 pour la période 1984-2015 : la période retenue pour notre étude est légèrement moins ventée (1%) que la moyenne des 30 dernières années ce qui constitue une approche conservatrice pour les prévisions de production.

### 3.4. LE MODÈLE D'ÉCOULEMENT DU VENT

Le modèle d'écoulement du vent utilisé est WASP, logiciel de référence dans l'industrie éolienne pour la prévision du vent et la production des parcs éoliens.

WASP permet à partir d'un modèle de terrain d'extrapoler les données des stations météorologiques vers le site du projet. Il tient compte de l'influence du relief, de la couverture de terrain (rugosité) et de la stabilité de l'atmosphère sur l'écoulement du vent.

WAsP est un modèle d'écoulement linéaire, adapté aux terrains non complexes. La complexité du site a été évaluée à partir de l'indicateur RIX (Ruggedness Index) qui détermine la complexité du site à partir d'une analyse des pentes du terrain. La valeur de RIX doit être proche de 0% pour respecter l'enveloppe de performance du modèle ce qui est bien le cas pour le site étudié.

A l'intérieur et à proximité d'une zone forestière ou d'obstacles de hauteur importante, il est recommandé d'appliquer dans WAsP une correction sur la hauteur du mât des éoliennes pour tenir compte de l'influence de la forêt et/ou obstacle sur le profil des vitesses du vent. La hauteur de déplacement est calculée à partir de la hauteur moyenne des obstacles environnants et de leur distance par rapport à l'éolienne.

### **3.5. LE MODÈLE DE TERRAIN**

Le modèle de terrain intègre une modélisation du relief sur un rayon de 10 km autour du site à partir des données satellites SRTM et une modélisation de la rugosité sur un rayon de 20 km à partir des données numériques Corine Land Cover. Cette construction du modèle répond aux recommandations du modèle WAsP et permet de tenir compte des effets de terrain sur le vent en amont du site.

Le modèle de terrain a été affiné par l'analyse de données exogènes (photos aériennes et cartes topographiques).

## 4. RESULTATS

Les résultats de l'étude se rapportent à une année normale de vent qui est représentative du climat moyen pendant la durée d'exploitation du parc éolien.

### 4.1. CLIMAT LOCAL DE VENT

Le climat local de vent a été calculé à hauteur de nacelle de chaque éolienne du projet. La distribution Weibull des vitesses de vent et la rose des vents utilisés pour caractériser le climat de vent sont illustrées à l'emplacement de l'éolienne E5 en projet à une altitude de 100 m au-dessus du sol (figure n°2).

Les graphiques indiquent que les vents dominants proviennent des secteurs sud-ouest et que les vents les plus fréquents ont une force proche des 6 m/s. Les caractéristiques du vent sont également données au tableau 5 à l'emplacement de l'éolienne E5 pour différentes altitudes au-dessus du sol.

Figure 2 Distribution des vitesses et rose énergétique à 100 m (au niveau de l'éolienne E5)

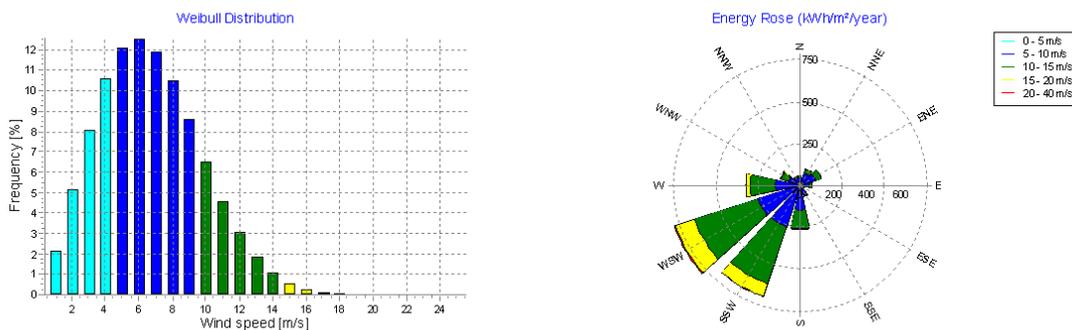


Tableau 5 Vitesse moyenne et distribution des vitesses calculées au niveau de l'éolienne E5

| HAUTEUR (M) | VITESSE MOYENNE (M/S) | PARAMÈTRE WEIBULL A | PARAMÈTRE WEIBULL K |
|-------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 100         | 6.49                  | 7.33                | 2.32                |
| 110         | 6.68                  | 7.54                | 2.31                |
| 119         | 6.84                  | 7.72                | 2.30                |

### 4.2. DENSITÉ DE L'AIR

La densité de l'air a été calculée à hauteur de mât et à l'emplacement de l'éolienne, à partir d'une extrapolation des températures relevées à la station de Beauvechain et de l'altitude du site. La densité moyenne sur le site s'élève 1.21 kg/m³ à une altitude de 110 mètres au-dessus du sol.

### 4.3. PRODUCTION ÉLECTRIQUE DU PROJET

La production électrique générée par le projet après repowering a été calculée à partir des distributions de vitesses à hauteur de mât combinée à la courbe de puissance des éoliennes.

Les résultats sont synthétisés au tableau 6 pour le projet de repowering :

- La production électrique annuelle brute ; qui correspond à l'énergie produite par le parc éolien sans aucune perte. Il s'agit d'une production théorique idéale.
- Les pertes de production systématiques ; qui sont décrites à la section 4.4
- La production électrique annuelle nette ; qui est égale à la production électrique brute moins l'ensemble des pertes de production systématiques
- L'indicateur « heures équivalent pleine charge » ; qui est égal au nombre d'heures pendant lequel l'éolienne devrait tourner à puissance nominale pour atteindre la production électrique nette.
- L'indicateur « facteur de charge »: qui est le rapport entre l'énergie électrique nette produite par l'éolienne sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période

**Tableau 6 Perspectives de production du projet de repowering Perwez**

| MODÈLE D'ÉOLIENNES                                     | SENVION<br>4.2M140 | NORDEX<br>N131/3600 | SENVION<br>3.4M122<br>NES | SENVION<br>4.2M140 |
|--|--------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|
| Nombre d'éoliennes                                     | 7                  | 7                   | 7                         | 7                  |
| Diamètre du rotor (m)                                  | 140                | 131                 | 122                       | 140                |
| Hauteur d'axe (m)                                      | 110                | 114                 | 119                       | variable           |
| Puissance éolienne (MW)                                | 4.2                | 3.6                 | 3.4                       | 4.2                |
| Puissance installée du parc (MW)                       | 29.4               | 25.2                | 23.8                      | 29.4               |
| Production électrique P50 brute (MWh/an)               | 95482              | 86489               | 76239                     | 93307              |
| Pertes systématiques cumulées (%)                      | 17.0               | 17.0                | 15.7                      | 17.2               |
| Production électrique P50 nette (MWh/an), Sans bridage | 79235              | 71825               | 64273                     | 77242              |
| Facteur de charge (%)                                  | 30.7               | 32.5                | 30.8                      | 30.0               |
| Heures équivalent pleine charge (h)                    | 2695               | 2850                | 2701                      | 2627               |

#### 4.4. PERTES DE PRODUCTION SYSTÉMATIQUES

La production électrique nette est obtenue en déduisant les pertes de production systématiques de la production brute. Ces pertes ont soit été calculées, soit estimées sur base d'hypothèses réalistes :

- **Effet de sillage entre éoliennes:** Pertes d'énergie liées à la diminution de l'énergie cinétique du vent en aval de l'éolienne. Les pertes de sillage ont été calculées sur le logiciel WINDPRO, avec le modèle de calcul NO Jensen, en tenant compte des éoliennes du parc en projet mais également des éoliennes existantes à proximité du site. Les huit éoliennes construites (I à VIII) ont été pris en compte dans le calcul des effets de sillage. Sept éoliennes autorisées ont également été prises en compte (A1 et L1 à L6).
- **Indisponibilité technique de l'éolienne:** Pertes de production liées aux arrêts de l'éolienne qui sont dus à la maintenance préventive ou corrective ou à des incidents techniques. Ces pertes peuvent être comparées avec les garanties de disponibilité offertes par les constructeurs qui avoisinent généralement les 97 % par an et par parc éolien (en termes de temps et non d'énergie). Ces pertes ont été estimées
- **Indisponibilité du raccordement électriques:** Pertes de production dues aux périodes d'indisponibilité de la cabine de tête, de la tête de ligne et/ou à la ligne de raccordement jusqu'au réseau électrique. Une perte standard de 0.3 %, correspondant 24 heures d'indisponibilité par an, a été appliquée.
- **Indisponibilité du réseau électrique:** Pertes de production dues aux périodes d'indisponibilité du réseau électrique. Une perte standard de 0.3 %, correspondant 24 heures d'indisponibilité par an, a été appliquée.
- **Pertes électriques:** Pertes liées au transformateur de l'éolienne et les pertes de transport jusqu'à la cabine de tête du client. Ces pertes ont été estimées : pertes liées au transformateur (~1%) + pertes câbles (~1%).
- **Pertes liées à la formation de glace:** Pertes de production dues à une diminution des performances et aux mises à l'arrêt de l'éolienne suite à l'accumulation de glace sur les pales de l'éolienne. Une perte standard de 0.5 % a été appliquée.
- **Hystérèse par vent fort:** Pertes de production lors des cycles de mises à l'arrêt et de redémarrage de l'éolienne pour les vitesses de vent proches de la vitesse de coupure l'éolienne. D'après la distribution des vitesses calculée, ces pertes peuvent être négligées
- **Contrôle de charge :** Pertes de production liées au contrôle de charge mis en place sur une ou plusieurs éoliennes du projet afin de respecter ses limites de conception. Ce contrôle de charge peut être réalisé en appliquant une régulation par secteur (wind sector management ou gestion par secteur) ou en modulant la vitesse de coupure de l'éolienne. Aucune restriction n'a été considérée pour ce projet.
- **Limite injection sur le réseau :** Pertes de production liées à la capacité maximale disponible au poste d'injection. La capacité maximale d'injection disponible de 28.8 MVA n'est jamais dépassée par le parc en projet : en considérant les effets de sillage et les pertes électriques, la puissance maximale du parc s'élèverait au poste à 28.8 MVA avec le modèle Senvion 3.4M140. Aucune restriction n'a été considérée pour ce projet.

**Tableau 7 Pertes de production systématique (en % de la production électrique brute)**

| TYPES DE PERTES                           | SENVION<br>4.2M140 | NORDEX<br>N131/3600 | SENVION<br>3.4M122<br>NES | SENVION<br>4.2M140 |
|---|--------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|
| Effet de sillages (%)                     | 11.7%              | 11.7%               | 10.3%                     | 11.9%              |
| Indisponibilité éolienne(%)               | 3.0%               | 3.0%                | 3.0%                      | 3.0%               |
| Indisponibilité raccordement %            | 0.3%               | 0.3%                | 0.3%                      | 0.3%               |
| Indisponibilité réseau électrique(%)      | 0.3%               | 0.3%                | 0.3%                      | 0.3%               |
| Pertes électriques (%)                    | 2.0%               | 2.0%                | 2.0%                      | 2.0%               |
| Pertes dues à la formation de glace (%)   | 0.5%               | 0.5%                | 0.5%                      | 0.5%               |
| Hystérèse par vent fort (%)               | 0.0%               | 0.0%                | 0.0%                      | 0.0%               |
| Limitation capacité injection réseau (%)  | 0.0%               | 0.0%                | 0.0%                      | 0.0%               |
| Autres pertes                             | 0.0%               | 0.0%                | 0.0%                      | 0.0%               |
| <b>Pertes systématiques calculées (%)</b> | <b>17.0%</b>       | <b>17.0%</b>        | <b>15.7%</b>              | <b>17.2%</b>       |

Les pertes de production sont converties en efficacité, par exemple une perte de 3 % est convertie en une efficacité de 97 % (=100%-3%). Ceci est fait pour l'ensemble de pertes considérées et pour chaque éolienne. Les différentes pertes sont finalement combinées en multipliant leur efficacité respective ce qui permet de calculer l'efficacité totale de chaque éolienne et du parc. La production nette de l'éolienne s'obtient en multipliant la production brute par l'efficacité calculée.

#### 4.5. PRODUCTION ÉLECTRIQUE DÉTAILLÉE PAR ÉOLIENNE SANS BRIDAGE

Les productions électriques nettes et les pertes de sillage sont détaillées au tableau suivant pour les éoliennes du projet de repowering. Les pertes de sillage sont exprimées en pourcent de la production électrique brute de l'éolienne.

**Tableau 8 Production électrique nette et pertes de sillage détaillées par éolienne**

| MODÈLE<br>D'ÉOLIENNES | SENVION 4.2M140                 |                       | NORDEX N131/3600                |                       | SENVION 3.4M122 NES             |                       | SENVION 4.2M140                 |                       |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| EOLIENNE N°           | PRODUCTION<br>NETTE<br>(MWH/AN) | PERTES<br>SILLAGE (%) |
| 1                     | 11821                           | 8.2                   | 10708                           | 8.1                   | 9585                            | 6.8                   | 11480                           | 8.4                   |
| 2                     | 11176                           | 13.5                  | 10134                           | 13.4                  | 9177                            | 11.0                  | 10833                           | 13.9                  |
| 3                     | 10908                           | 14.3                  | 9905                            | 14.1                  | 8956                            | 11.9                  | 10910                           | 14.3                  |
| 4                     | 11794                           | 8.4                   | 10684                           | 8.4                   | 9502                            | 7.6                   | 11171                           | 8.7                   |
| 5                     | 11491                           | 10.6                  | 10410                           | 10.6                  | 9275                            | 9.6                   | 10805                           | 11.1                  |
| 6                     | 11052                           | 13.1                  | 10020                           | 13.1                  | 8912                            | 12.3                  | 11053                           | 13.1                  |
| 7                     | 10991                           | 14.1                  | 9963                            | 14.0                  | 8866                            | 13.2                  | 10991                           | 14.1                  |

#### 4.6. PERTES DE PRODUCTION GÉNÉRÉES PAR LES DIRECTIVES DE BRIDAGES

Les scénarios de bridage définis dans l'étude d'incidences ont été pris en compte dans cette étude afin d'évaluer leur impact sur la production du projet de repowering:

- **Bridage acoustique** afin de respecter les normes de bruit selon les conditions générales ou sectorielles applicables au parc éolien de plus de 0.5 MW ;
- **Module d'arrêt chauve-souris** afin d'arrêter les éoliennes en projet pendant les périodes d'activité chiroptérologique
- **Module d'arrêt ombre portée** afin d'arrêter les éoliennes lorsque l'ombre portée cause une gêne au voisinage
- **Bridage cumulatif** lorsque l'ensemble des programmes de bridage (acoustique, module d'arrêt chauve-souris et ombre) sont d'application

Les directives de bridage transmises par Sertius sont fournies à l'annexe 2 du rapport ainsi que la méthode de calcul pour évaluer les pertes de production. Les pertes de production induites par les programmes de bridage sont résumées au tableau 9 pour l'ensemble du projet. Le détail des pertes par éolienne est disponible à l'annexe 2.

**Tableau 9 Impact des directives de bridage sur la production du projet de repowering**

| MODÈLE D'ÉOLIENNE   | SENVION<br>4.2M140 | NORDEX<br>N131/3600 | SENVION<br>3.4M122<br>NES | SENVION<br>4.2M140 |
|---|--------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|
| Production électrique nette (MWh/an), sans bridage  | 79235              | 71825               | 64273                     | 77242              |
| <b>Avec bridage acoustique (conditions générales) :</b>                                   |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 74413              | 68788               | 60311                     | 72863              |
| Pertes bridage (%)  | 6.1%               | 4.2%                | 6.2%                      | 5.7%               |
| <b>Avec bridage acoustique (conditions sectorielles) :</b>                                |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 76277              | 69913               | 62277                     | 74472              |
| Pertes bridage (%)  | 3.7%               | 2.7%                | 3.1%                      | 3.6%               |
| <b>Avec module d'arrêt chauve-souris :</b>  |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 77263              | 70040               | 62745                     | 75250              |
| Pertes bridage (%)  | 2.5%               | 2.5%                | 2.4%                      | 2.6%               |
| <b>Avec module d'arrêt ombre :</b>  |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 79148              | 71745               | 64202                     | 77156              |
| Pertes bridage (%)  | 0.1%               | 0.1%                | 0.1%                      | 0.1%               |
| <b>Avec bridage cumulé (acoustique conditions générales + chauve-souris + ombre) :</b>    |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 72482              | 67005               | 58812                     | 70907              |
| Pertes bridage (%)  | 8.5%               | 6.7%                | 8.5%                      | 8.2%               |
| <b>Avec bridage cumulé (acoustique conditions sectorielles + chauve-souris + ombre) :</b> |                    |                     |                           |                    |
| Production électrique P50 nette (MWh/an)  | 74300              | 68102               | 60730                     | 72473              |
| Pertes bridage (%)  | 6.2%               | 5.2%                | 5.5%                      | 6.2%               |

#### 4.7. IMPACT DU REPOWERING SUR LES PROJETS VOISINS

L'impact du projet de repowering d'Eneco sur les éoliennes existantes et autorisées est repris ci-dessous dans le tableau.

La méthodologie utilisée pour évaluer les pertes de production générées par le projet de repowering sur les éoliennes existantes et autorisées consiste à calculer la production de ces dernières sans le projet de repowering (mais bien avec les 8 existantes) et de la comparer avec la production de ces éoliennes avec les 7 nouvelles éoliennes. Le différentiel permet de déterminer les pertes de production imputables au projet de repowering : elles sont exprimées en pourcentage de la production totale.

**Tableau 10: impact du repowering sur les projets existants et autorisés voisins**

| Pertes bridage (%)                                   | SENVION 4.2M140                     | NORDEX N131/3600                    | SENVION 3.4M122                     | SENVION 4.2M140                     |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| EOLIENNE N°  | PERTES SILLAGES SUPPLÉMENTAIRES (%) |
| A1   | 2.7                                 | 2.7                                 | 1.6                                 | 2.7                                 |
| <b>Pertes de sillage supp. sur le parc de Aische</b> | <b>2.7</b>                          | <b>2.7</b>                          | <b>1.6</b>                          | <b>2.7</b>                          |
| L1   | 0.4                                 | 0.4                                 | 0.2                                 | 0.4                                 |
| L2   | 0.2                                 | 0.2                                 | 0.1                                 | 0.2                                 |
| L3   | 0.1                                 | 0.1                                 | 0.1                                 | 0.1                                 |
| L4   | 0.7                                 | 0.7                                 | 0.4                                 | 0.7                                 |
| L5   | 0.5                                 | 0.4                                 | 0.2                                 | 0.5                                 |
| L6   | 0.2                                 | 0.2                                 | 0.1                                 | 0.2                                 |
| <b>Pertes sillages supp. sur le parc de Liernu</b>   | <b>0.3</b>                          | <b>0.3</b>                          | <b>0.2</b>                          | <b>0.4</b>                          |
| I  | 2.7                                 | 2.6                                 | 1.8                                 | 2.7                                 |
| II   | 2.7                                 | 2.6                                 | 1.7                                 | 2.7                                 |
| III  | 2.5                                 | 2.5                                 | 1.5                                 | 2.5                                 |
| IV   | 1.0                                 | 1.0                                 | 0.6                                 | 1.0                                 |
| V  | 0.5                                 | 0.5                                 | 0.3                                 | 0.5                                 |
| <b>Pertes sillages supp. sur le parc de Aspiravi</b> | <b>1.9</b>                          | <b>1.8</b>                          | <b>1.2</b>                          | <b>1.9</b>                          |
| VI   | 2.0                                 | 1.9                                 | 1.2                                 | 2.0                                 |
| VII  | 0.9                                 | 0.9                                 | 0.5                                 | 0.9                                 |
| VIII   | 2.1                                 | 2.1                                 | 1.3                                 | 2.1                                 |
| <b>Pertes sillages supp. sur le parc Sud d'Eneco</b> | <b>1.6</b>                          | <b>1.6</b>                          | <b>1.0</b>                          | <b>1.7</b>                          |
| <b>moyenne pondérée</b>                              | <b>0.9</b>                          | <b>0.9</b>                          | <b>0.4</b>                          | <b>0.9</b>                          |

On constate que les pertes par effets de sillages sur les parcs voisins augmentent légèrement lorsque l'on considère le projet de repowering : la production globale du parc d'Aspiravi diminue légèrement, de l'ordre de 1.2 à 1.9%

## 5. CONCLUSIONS

---

Le climat de vent et la production annuelle du projet en repowering ont été évalués à partir d'un modèle d'écoulement du vent et des données de vent provenant de stations météorologiques disponibles dans la région.

Les résultats de cette étude se rapportent à une année de vent normale, c.à.d. une année représentative du climat moyen pendant la durée d'exploitation du parc éolien.

A 110 m d'altitude, au niveau de l'éolienne 5, la vitesse moyenne du vent est de 6.68m/s avec des vents dominants du secteur sud-ouest.

La production électrique annuelle nette générée par le parc éolien sans bridage s'élève à

- 79.3 GWh avec 7 Servion 4.2M140
- 71.8 GWh avec 7 Nordex N131/3.6
- 64.3 GWh avec 7 Servion 3.4M122
- 77.2 GWh avec 7 Servion 4.2M140 (scénario de hauteur variable)

L'application des consignes de bridage acoustique pour respecter les conditions sectorielles engendre une perte de production supplémentaire comprise entre 2.7% et 3.8% de la production totale nette du parc en projet suivant le modèle d'éolienne retenu. L'activation du module d'arrêt chauve-souris provoque une perte de production supplémentaire comprise entre 2.3% et 2.5% de la production totale du parc en projet. L'application du module d'arrêt ombre portée engendre une perte de production supplémentaire équivalente à 0.1% de la production du parc éolien.

L'impact du projet de repowering sur les éoliennes voisines existantes et autorisées a été étudié et est globalement faible. L'éolienne d'Aische la plus exposée voit sa production dégradé par effet de sillage supplémentaire de 1.6 à 2.7% suivant le modèle installé.

Le projet de repowering de Perwez permettrait, avec les modèles d'éoliennes Servion 4.2M140, de tripler la production actuelle du parc de Perwez évaluée à 26 GWh annuel sans bridage, le tout en passant de 8 à 7 éoliennes.

## BIBLIOGRAPHIE & RÉFÉRENCES

---

- [1] Measnet, Evaluation of site specific wind conditions, 2009
- [2] IEA, Wind speed measurement and use of cup anemometry, Second Print 2003
- [3] UCL-KMI-VITO-3E, Improved Prediction of Wind Power in Belgium, 2006,
- [4] Standard Loss Definitions for Wind Resource/ Energy Assessments, AWEA 2008, Steve Jones, Global Energy Concepts
- [5] IEC61400-1 ed3 (2005), Wind Turbines, Part 1 : Design Requirements
- [6] WASP standard parameters , “WAsP and forests”, WAsP 9 Help Facility
- [7] Optimising the parametrisation of forests for WAsP wind speed calculations; a retrospective empirical study, GL Garrad Hassan, J.F Corbett

## Appendix 1 - COURBES DE PUISSANCE

Figure 3 Senvion 4.2M140

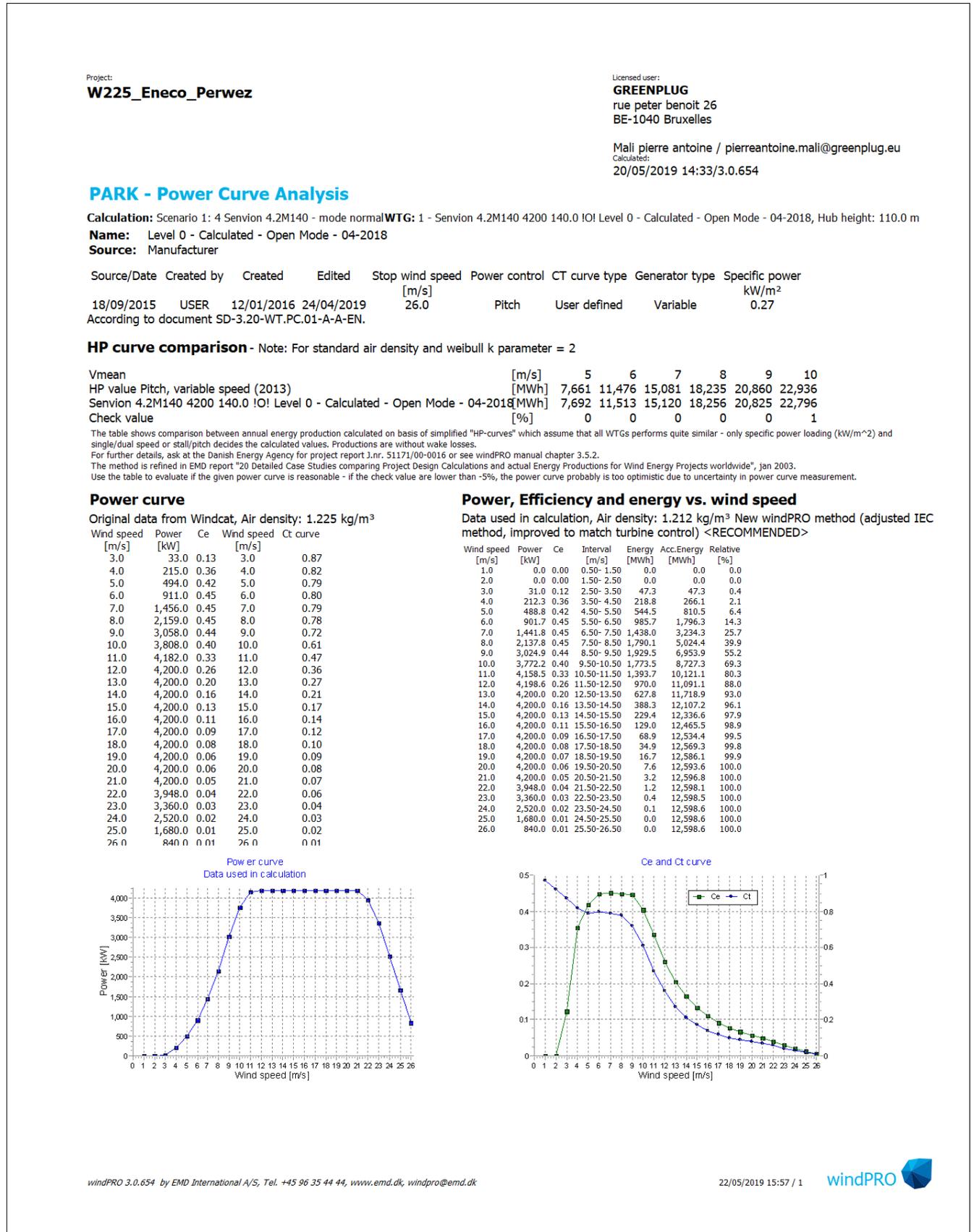


Figure 4 Nordex N131 3.6

Project:  
**W225\_Eneco\_Perwez**

Licensed user:  
**GREENPLUG**  
rue peter benoit 26  
BE-1040 Bruxelles

Mali pierre antoine / pierreantoine.mali@greenplug.eu  
Calculated:  
20/05/2019 15:45/3.0.654

**PARK - Power Curve Analysis**

**Calculation:** Scenario 1: 4 Nordex N131 3.6 - start@6 **WTG:** 1 - NORDEX N131/3600 3600 131.0 IO! Mode 00 - 1.225kg/m<sup>3</sup> - start@6 - R08, Hub height: 114.0 m  
**Name:** Mode 00 - 1.225kg/m<sup>3</sup> - start@6 - R08  
**Source:** Nordex

| Source/Date | Created by | Created    | Edited     | Stop wind speed [m/s] | Power control | CT curve type | Generator type | Specific power kW/m <sup>2</sup> |
|-------------|------------|------------|------------|-----------------------|---------------|---------------|----------------|----------------------------------|
| 27/02/2019  | USER       | 27/02/2019 | 27/04/2019 | 25.0                  | Pitch         | User defined  | Variable       | 0.27                             |

**HP curve comparison** - Note: For standard air density and weibull k parameter = 2

| Vmean [m/s]  | 5     | 6     | 7      | 8      | 9      | 10     |
|--|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| HP value Pitch, variable speed (2013) [MWh]  | 6,679 | 9,973 | 13,071 | 15,772 | 18,014 | 19,783 |
| NORDEX N131/3600 3600 131.0 IO! Mode 00 - 1.225kg/m <sup>3</sup> - start@6 - R08 [MWh] | 5,572 | 9,073 | 12,367 | 15,215 | 17,542 | 19,333 |
| Check value [%]  | 20    | 10    | 6      | 4      | 3      | 2      |

The table shows comparison between annual energy production calculated on basis of simplified "HP-curves" which assume that all WTGs performs quite similar - only specific power loading (kW/m<sup>2</sup>) and single/dual speed or stall/pitch decides the calculated values. Productions are without wake losses.  
For further details, ask at the Danish Energy Agency for project report J.nr. 51171/00-0016 or see windPRO manual chapter 3.5.2.  
The method is refined in EMD report "20 Detailed Case Studies comparing Project Design Calculations and actual Energy Productions for Wind Energy Projects worldwide", jan 2003.  
Use the table to evaluate if the given power curve is reasonable - if the check value are lower than -5%, the power curve probably is too optimistic due to uncertainty in power curve measurement.

**Power curve**

Original data from Windcat, Air density: 1.225 kg/m<sup>3</sup>

| Wind speed [m/s] | Power [kW] | Ce [m/s] | Wind speed [m/s] | Ct curve |
|------------------|------------|----------|------------------|----------|
| 5.9              | 0.0        | 0.00     | 3.9              | 0.92     |
| 6.0              | 828.0      | 0.46     | 3.5              | 0.90     |
| 6.5              | 1,059.0    | 0.47     | 4.0              | 0.89     |
| 7.0              | 1,277.0    | 0.47     | 4.5              | 0.88     |
| 7.5              | 1,632.0    | 0.47     | 5.0              | 0.87     |
| 8.0              | 1,978.0    | 0.47     | 5.5              | 0.86     |
| 8.5              | 2,252.0    | 0.46     | 6.0              | 0.86     |
| 9.0              | 2,758.0    | 0.46     | 6.5              | 0.85     |
| 9.5              | 3,100.0    | 0.44     | 7.0              | 0.85     |
| 10.0             | 3,344.0    | 0.41     | 7.5              | 0.85     |
| 10.5             | 3,502.0    | 0.37     | 8.0              | 0.84     |
| 11.0             | 3,585.0    | 0.33     | 8.5              | 0.82     |
| 11.5             | 3,600.0    | 0.29     | 9.0              | 0.79     |
| 12.0             | 3,600.0    | 0.25     | 9.5              | 0.74     |
| 12.5             | 3,600.0    | 0.22     | 10.0             | 0.69     |
| 13.0             | 3,600.0    | 0.20     | 10.5             | 0.65     |
| 13.5             | 3,600.0    | 0.18     | 11.0             | 0.62     |
| 14.0             | 3,600.0    | 0.16     | 11.5             | 0.59     |
| 14.5             | 3,600.0    | 0.14     | 12.0             | 0.54     |
| 15.0             | 3,600.0    | 0.13     | 12.5             | 0.50     |
| 15.5             | 3,600.0    | 0.12     | 13.0             | 0.46     |
| 16.0             | 3,600.0    | 0.11     | 13.5             | 0.43     |
| 16.5             | 3,600.0    | 0.10     | 14.0             | 0.41     |
| 17.0             | 3,600.0    | 0.09     | 14.5             | 0.39     |
| 17.5             | 3,600.0    | 0.08     | 15.0             | 0.37     |
| 18.0             | 3,600.0    | 0.07     | 15.5             | 0.35     |
| 18.5             | 3,600.0    | 0.07     | 16.0             | 0.34     |
| 19.0             | 3,600.0    | 0.06     | 16.5             | 0.33     |
| 19.5             | 3,600.0    | 0.06     | 17.0             | 0.32     |
| 20.0             | 3,600.0    | 0.05     | 17.5             | 0.31     |
| 20.5             | 3,600.0    | 0.05     | 18.0             | 0.30     |
| 21.0             | 3,600.0    | 0.05     | 18.5             | 0.29     |
| 21.5             | 3,600.0    | 0.04     | 19.0             | 0.29     |
| 22.0             | 3,600.0    | 0.04     | 19.5             | 0.28     |
| 22.5             | 3,453.0    | 0.04     | 20.0             | 0.28     |
| 23.0             | 3,186.0    | 0.03     | 20.5             | 0.27     |
| 23.5             | 2,952.0    | 0.03     | 21.0             | 0.27     |
| 24.0             | 2,736.0    | 0.02     | 21.5             | 0.26     |
| 24.5             | 2,592.0    | 0.02     | 22.0             | 0.26     |
| 25.0             | 2,520.0    | 0.02     | 22.5             | 0.25     |
|                  |            |          | 23.0             | 0.25     |
|                  |            |          | 23.5             | 0.24     |
|                  |            |          | 24.0             | 0.24     |
|                  |            |          | 24.5             | 0.23     |
|                  |            |          | 25.0             | 0.23     |

**Power, Efficiency and energy vs. wind speed**

Data used in calculation, Air density: 1.211 kg/m<sup>3</sup> New windPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>

| Wind speed [m/s] | Power [kW] | Ce   | Interval [m/s] | Energy [MWh] | Acc.Energy [MWh] | Relative [%] |
|------------------|------------|------|----------------|--------------|------------------|--------------|
| 1.0              | 0.0        | 0.00 | 0.50-1.50      | 0.0          | 0.0              | 0.0          |
| 2.0              | 0.0        | 0.00 | 1.50-2.50      | 0.0          | 0.0              | 0.0          |
| 3.0              | 0.0        | 0.00 | 2.50-3.50      | 0.0          | 0.0              | 0.0          |
| 4.0              | 0.0        | 0.00 | 3.50-4.50      | 0.0          | 0.0              | 0.0          |
| 5.0              | 0.0        | 0.00 | 4.50-5.50      | 0.0          | 0.0              | 0.0          |
| 6.0              | 636.3      | 0.36 | 5.50-6.50      | 536.6        | 536.6            | 5.3          |
| 7.0              | 1,312.5    | 0.47 | 6.50-7.50      | 1,271.9      | 1,808.5          | 17.7         |
| 8.0              | 1,956.4    | 0.47 | 7.50-8.50      | 1,603.3      | 3,411.8          | 33.4         |
| 9.0              | 2,727.3    | 0.46 | 8.50-9.50      | 1,743.5      | 5,155.3          | 50.5         |
| 10.0             | 3,319.9    | 0.41 | 9.50-10.50     | 1,595.3      | 6,750.7          | 66.1         |
| 11.0             | 3,574.2    | 0.33 | 10.50-11.50    | 1,234.8      | 7,985.4          | 78.2         |
| 12.0             | 3,600.0    | 0.26 | 11.50-12.50    | 857.2        | 8,842.6          | 86.6         |
| 13.0             | 3,600.0    | 0.20 | 12.50-13.50    | 560.4        | 9,403.0          | 92.1         |
| 14.0             | 3,600.0    | 0.16 | 13.50-14.50    | 351.1        | 9,754.1          | 95.5         |
| 15.0             | 3,600.0    | 0.13 | 14.50-15.50    | 210.4        | 9,964.4          | 97.6         |
| 16.0             | 3,600.0    | 0.11 | 15.50-16.50    | 120.2        | 10,084.6         | 98.7         |
| 17.0             | 3,600.0    | 0.09 | 16.50-17.50    | 65.4         | 10,150.0         | 99.4         |
| 18.0             | 3,600.0    | 0.08 | 17.50-18.50    | 33.8         | 10,183.8         | 99.7         |
| 19.0             | 3,600.0    | 0.06 | 18.50-19.50    | 16.5         | 10,200.3         | 99.9         |
| 20.0             | 3,600.0    | 0.06 | 19.50-20.50    | 7.7          | 10,208.0         | 99.9         |
| 21.0             | 3,600.0    | 0.05 | 20.50-21.50    | 3.4          | 10,211.3         | 100.0        |
| 22.0             | 3,600.0    | 0.04 | 21.50-22.50    | 1.4          | 10,212.7         | 100.0        |
| 23.0             | 3,186.0    | 0.03 | 22.50-23.50    | 0.5          | 10,213.2         | 100.0        |
| 24.0             | 2,736.0    | 0.02 | 23.50-24.50    | 0.2          | 10,213.4         | 100.0        |
| 25.0             | 2,520.0    | 0.02 | 24.50-25.50    | 0.0          | 10,213.4         | 100.0        |

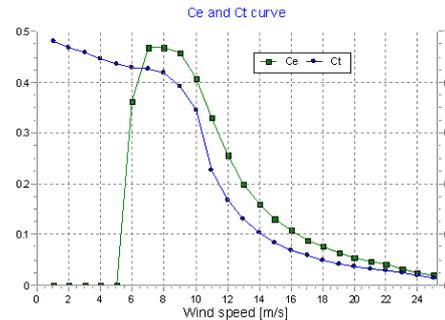
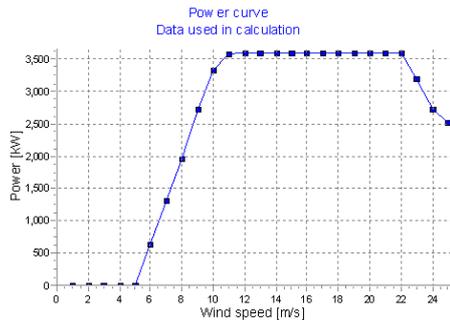
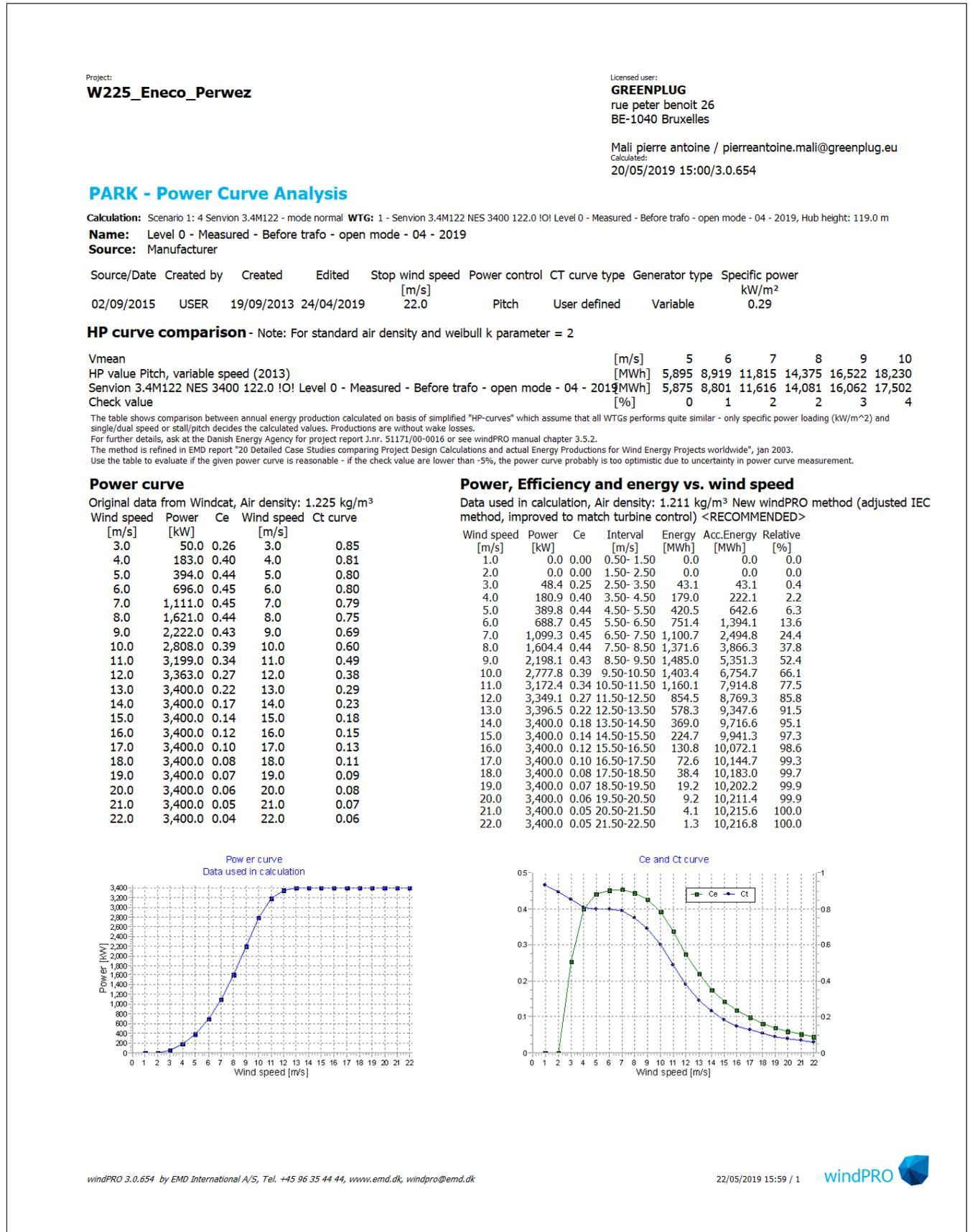


Figure 5 Senvion 3.4M122



## Appendix 2 - IMPACT DES PROGRAMMES DE BRIDAGE

Le calcul des pertes de production induites par les directives de bridage est détaillé dans cette annexe pour le parc éolien en projet.

### Bridage acoustique

#### Consignes de bridage

Le bureau Sertius en charge de l'étude d'incidences a évalué la mise en place de bridages acoustiques sur les éoliennes existantes et en en projet afin de respecter ;

- les normes sonores prévues dans les conditions sectorielles relatives au parc éolien de plus de 0.5 MW
- les normes sonores prévues dans les conditions générales d'exploitation

Les valeurs limites générales de niveaux de bruit sont reprises au tableau 10 selon les conditions générales et sectorielles.

**Tableau 11 Résumé des normes de bruit dB(A) selon les conditions générales et sectorielles**

|                         | ZONE D'IMMISSION  | JOUR | TRANSITION | NUIT                      |                      |
|-------------------------|---|------|------------|---------------------------|----------------------|
|                         |   |      |            | HORS CONDITIONS ESTIVALES | CONDITIONS ESTIVALES |
| CONDITIONS GÉNÉRALES    | Zones d'habitat et d'habitat à caractère rural                        | 50   | 45         | 40                        |                      |
|                         | Zones agricoles, forestières, d'espaces verts, naturelles et de parcs | 50   | 45         | 40                        |                      |
|                         | Zones de loisirs, de services publics et d'équipements communautaires | 55   | 50         | 45                        |                      |
| CONDITIONS SECTORIELLES | Zone habitat et habitat à caractère rural                             | 45   | 45         | 43                        | 40                   |
|                         | Zones agricoles, forestières, d'espaces verts, naturelles et de parcs | 45   | 45         | 43                        | 43                   |
|                         | Zones de loisirs, de services publics et d'équipements communautaires | 55   | 50         | 45                        | 45                   |

Les conditions nocturnes sont considérées comme estivales pour la nuit à venir lorsque la température atteint 16 degrés centigrades à 22 heures à la station météorologique de l'I.R.M. la plus proche du parc d'éoliennes.

Les programmes de bridage ont été spécifiés par Sertius afin de respecter ces deux normes.

| <b>Conditions générales</b>           |                 |                |                   |                |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------|----------------|
| <b>Modèle</b>                         | <b>Eolienne</b> | <b>Période</b> |                   |                |
|                                       |                 | <b>Jour</b>    | <b>Transition</b> | <b>Nuit</b>    |
| Senvion 4.2M140<br>(hauteur fixe)     | WT1             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 5</b>  |
|                                       | WT2             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT3             | Mode 0         | <b>Mode 2</b>     | <b>Mode 6</b>  |
|                                       | WT4             | Mode 0         | <b>Mode 2</b>     | <b>Mode 6</b>  |
|                                       | WT5             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 4</b>  |
|                                       | WT6             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT7             | Mode 0         | <b>Mode 2</b>     | <b>Mode 5</b>  |
|                                       |                 | <b>Jour</b>    | <b>Transition</b> | <b>Nuit</b>    |
| Nordex N131 3.6                       | WT1             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 8</b>  |
|                                       | WT2             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 4</b>  |
|                                       | WT3             | Mode 0         | <b>Mode 4</b>     | <b>Mode 12</b> |
|                                       | WT4             | Mode 0         | <b>Mode 3</b>     | <b>Mode 12</b> |
|                                       | WT5             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 8</b>  |
|                                       | WT6             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 1</b>  |
|                                       | WT7             | Mode 0         | <b>Mode 2</b>     | <b>Mode 12</b> |
|                                       |                 | <b>Jour</b>    | <b>Transition</b> | <b>Nuit</b>    |
| Senvion 3.4M122                       | WT1             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 4</b>  |
|                                       | WT2             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT3             | Mode 0         | <b>Mode 1</b>     | <b>Mode 4</b>  |
|                                       | WT4             | Mode 0         | <b>Mode 1</b>     | <b>Mode 4</b>  |
|                                       | WT5             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 4</b>  |
|                                       | WT6             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT7             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       |                 | <b>Jour</b>    | <b>Transition</b> | <b>Nuit</b>    |
| Senvion 4.2M140<br>(hauteur variable) | WT1             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 5</b>  |
|                                       | WT2             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT3             | Mode 0         | <b>Mode 2</b>     | <b>Mode 6</b>  |
|                                       | WT4             | Mode 0         | <b>Mode 1</b>     | <b>Mode 6</b>  |
|                                       | WT5             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT6             | Mode 0         | Mode 0            | <b>Mode 3</b>  |
|                                       | WT7             | Mode 0         | <b>Mode 2</b>     | <b>Mode 5</b>  |

| <b>Conditions sectorielles</b>        |          |         |            |                 |            |
|---------------------------------------|----------|---------|------------|-----------------|------------|
| Modèle                                | Eolienne | Période |            |                 |            |
|                                       |          | Jour    | Transition | Nuit - Hors été | Nuit - été |
| Senvion 4.2M140<br>(hauteur fixe)     | WT1      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 1          | Mode 1     |
|                                       | WT2      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 2     |
|                                       | WT3      | Mode 2  | Mode 2     | Mode 6          | Mode 5     |
|                                       | WT4      | Mode 2  | Mode 2     | Mode 4          | Mode 4     |
|                                       | WT5      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT6      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT7      | Mode 2  | Mode 2     | Mode 5          | Mode 5     |
|                                       |          | Jour    | Transition | Nuit - Hors été | Nuit - été |
| Nordex N131 3.6                       | WT1      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT2      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 4     |
|                                       | WT3      | Mode 4  | Mode 4     | Mode 11         | Mode 11    |
|                                       | WT4      | Mode 3  | Mode 3     | Mode 7          | Mode 6     |
|                                       | WT5      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT6      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT7      | Mode 2  | Mode 2     | Mode 9          | Mode 5     |
|                                       |          | Jour    | Transition | Nuit - Hors été | Nuit - été |
| Senvion 3.4M122                       | WT1      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT2      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 2     |
|                                       | WT3      | Mode 1  | Mode 1     | Mode 4          | Mode 3     |
|                                       | WT4      | Mode 1  | Mode 1     | Mode 3          | Mode 3     |
|                                       | WT5      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT6      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT7      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 3          | Mode 2     |
|                                       |          | Jour    | Transition | Nuit - Hors été | Nuit - été |
| Senvion 4.2M140<br>(hauteur variable) | WT1      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 1          | Mode 1     |
|                                       | WT2      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 2     |
|                                       | WT3      | Mode 2  | Mode 2     | Mode 6          | Mode 5     |
|                                       | WT4      | Mode 1  | Mode 1     | Mode 4          | Mode 4     |
|                                       | WT5      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT6      | Mode 0  | Mode 0     | Mode 0          | Mode 0     |
|                                       | WT7      | Mode 2  | Mode 2     | Mode 5          | Mode 4     |

## Hypothèses

Sur base des consignes de bridage établies par Sertius, on détermine la durée effective de chaque période de bridage auquel on fait correspondre l'utilisation d'une courbe de puissance bridée.

Les courbes de puissance bridées proviennent des fiches techniques fournies par les constructeurs et sont reprises à l'annexe 1. Pour chaque éolienne, on applique le mode de bridage le plus contraignant à toutes les plages de vitesse, ce qui est conservatif au niveau du calcul de pertes. Lorsque le mode de bridage n'est pas disponible auprès du constructeur, nous considérons l'arrêt de l'éolienne.

On considère les distributions de vitesses du vent calculées à hauteur de nacelle de l'éolienne par le modèle WAsP. On ne prend pas en compte un régime de vent différent pour les périodes où l'éolienne est bridée par rapport à la normale annuelle.

La durée des différentes périodes de bridage dépend des normes considérées:

- Conditions générales :
  - Période de nuit : 33% de l'année
  - Période de transition : 25% de l'année
  - Période de jour ; 42% de l'année

- Conditions sectorielles
  - Période de jour et transition : 66.7% de l'année
  - Période de nuit non estivale: 27.9% de l'année
  - Période de nuit estivale : 5.4% de l'année

## Résultats

Les résultats de production, avec et sans bridage acoustique, sont présentés aux tableaux suivants pour les 3 modèles d'éoliennes étudiés.

**Tableau 12 Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Senvion 4.2M140)**

|    | SANS BRIDAGE ACOUSTIQUE   | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                      | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                         | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 11821                     | 11046  | 6.6%                                     | 11768   | 0.4%                                     |
| E2 | 11176                     | 10971  | 1.8%                                     | 11218   | -0.4%                                    |
| E3 | 10908                     | 9879   | 9.4%                                     | 9750  | 10.6%                                    |
| E4 | 11794                     | 10583  | 10.3%                                    | 10921   | 7.4%                                     |
| E5 | 11491                     | 10967  | 4.6%                                     | 11519   | -0.2%                                    |
| E6 | 11052                     | 10781  | 2.5%                                     | 11086   | -0.3%                                    |
| E7 | 10991                     | 10186  | 7.3%                                     | 10014   | 8.9%                                     |

**Tableau 13 Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Nordex N131)**

|    | SANS BRIDAGE ACOUSTIQUE   | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                      | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                         | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 10708                     | 10283  | 4.0%                                     | 10752   | -0.4%                                    |
| E2 | 10134                     | 10107  | 0.3%                                     | 10157   | -0.2%                                    |
| E3 | 9905                      | 9225   | 6.9%                                     | 9113  | 8.0%                                     |
| E4 | 10684                     | 9891   | 7.4%                                     | 10024   | 6.2%                                     |
| E5 | 10410                     | 9974   | 4.2%                                     | 10431   | -0.2%                                    |
| E6 | 10020                     | 10021  | 0.0%                                     | 10046   | -0.3%                                    |
| E7 | 9963                      | 9287   | 6.8%                                     | 9389  | 5.8%                                     |

**Tableau 14 Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Senvion 3.4M122)**

|    | SANS BRIDAGE ACOUSTIQUE   | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                      | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                         | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 9585                      | 8940   | 6.7%                                     | 9615  | -0.3%                                    |
| E2 | 9177                      | 8773   | 4.4%                                     | 9161  | 0.2%                                     |
| E3 | 8956                      | 8281   | 7.5%                                     | 8114  | 9.4%                                     |
| E4 | 9502                      | 8732   | 8.1%                                     | 8707  | 8.4%                                     |
| E5 | 9275                      | 8650   | 6.7%                                     | 9291  | -0.2%                                    |
| E6 | 8912                      | 8487   | 4.8%                                     | 8927  | -0.2%                                    |
| E7 | 8866                      | 8448   | 4.7%                                     | 8461  | 4.6%                                     |

**Tableau 15: Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Senvion 4.2M140- Hauteur Alternative)**

|    | SANS BRIDAGE ACOUSTIQUE   | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE ACOUSTIQUE (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                      | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                         | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 11480                     | 10742  | 6.4%                                     | 11426   | 0.5%                                     |
| E2 | 10833                     | 10633  | 1.8%                                     | 10868   | -0.3%                                    |
| E3 | 10910                     | 9877   | 9.5%                                     | 9749  | 10.6%                                    |
| E4 | 11171                     | 10098  | 9.6%                                     | 10465   | 6.3%                                     |
| E5 | 10805                     | 10547  | 2.4%                                     | 10828   | -0.2%                                    |
| E6 | 11053                     | 10780  | 2.5%                                     | 11086   | -0.3%                                    |
| E7 | 10991                     | 10185  | 7.3%                                     | 10049   | 8.6%                                     |

## Module d'arrêt chauve-souris

### Consignes de bridage

Un système d'arrêt sur l'éolienne en projet est recommandé durant les périodes d'activité chiroptérologique significative. Les conditions d'arrêt ont été transmises par le bureau Sertius en charge de l'étude d'incidences avec arrêt de l'éolienne dans les conditions cumulatives suivantes ;

#### **Période A : Du 1er avril au 31 juillet de chaque année et du 16 octobre au 31 octobre:**

- Pendant 6h après le coucher du soleil
- lorsque la vitesse du vent est inférieure à 6 m/s à hauteur de la nacelle,
- lorsque la température de l'air est supérieure à 10°C,
- En l'absence de précipitations

### **Période B ; Du 1 août au 15 octobre de chaque année :**

- Entre le coucher du soleil et le lever du soleil
- lorsque la vitesse du vent est inférieure à 7 mètres par seconde à hauteur de la nacelle,
- lorsque la température de l'air est supérieure à 8°C,
- En l'absence de précipitations

### **Hypothèses**

Sur base des consignes présentées ci-dessus, on détermine la durée effective de chaque période de bridage auquel on fait correspondre l'utilisation d'une courbe de puissance bridée. Pour les deux périodes, on utilise une courbe de puissance bridée avec une vitesse de démarrage à 6 et 7 m/s.

On considère les distributions de vitesses du vent calculées à hauteur de nacelle de l'éolienne par le modèle WAsP et données au paragraphe 4.1. On ne prend pas en compte un régime de vent différent durant les périodes d'arrêt de l'éolienne par rapport à la normale annuelle. Il s'agit d'une approche conservatrice au niveau du calcul des pertes, les périodes de bridage étant en moyenne moins ventées (période estivale) que la normale annuelle.

La durée effective de chaque période est évaluée en considérant :

- les heures des levers et couchers du soleil provenant de la station d'Uccle représentatives pour le site étudié
- les données horaires de température provenant de la station météorologique de Beauvechain. On fait l'hypothèse que ces mesures de température sont représentatives des températures sur le site
- qu'il ne pleut jamais ce qui constitue une approche maximaliste en terme de pertes. Nous ne disposons pas de mesures locales de précipitations. A titre indicatif, le niveau normal de précipitations mesuré à Uccle s'élève à 850 mm par an. En considérant une pluie de faible intensité (2 mm d'eau par heure), on estime à 425 h le nombre heures par an où il pleut, soit 4.2 % du temps. L'impact du critère précipitation sur la mise à l'arrêt de l'éolienne est considéré comme faible.

D'après les calculs, réalisé heure par heure, le module d'arrêt auquel correspond l'utilisation d'une courbe de puissance bridée sera actif :

- Période A : 5.9% de l'année
- Période B : 8.4 % de l'année

Les calculs ne tiennent pas compte du régime transitoire de fonctionnement de l'éolienne lors des cycles de démarrage/ arrêt imposés par le système de régulation chauve-souris.

### **Résultats**

Les résultats de production, sans et avec système d'arrêt chiro, sont présentés aux tableaux suivants.

**Tableau 16 Impact du module d'arrêt chauve-souris sur la production électrique nette MWh/an du projet Perwez (Servion 4.2M140)**

| EOLIENNES | SANS SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|--|
| E1        | 11821                      | 11535                      | 2.4%                                     |
| E2        | 11176                      | 10890                      | 2.6%                                     |
| E3        | 10908                      | 10616                      | 2.7%                                     |
| E4        | 11794                      | 11523                      | 2.3%                                     |
| E5        | 11491                      | 11218                      | 2.4%                                     |
| E6        | 11052                      | 10780                      | 2.5%                                     |
| E7        | 10991                      | 10702                      | 2.6%                                     |

**Tableau 17 Impact du module d'arrêt chauve-souris sur la production électrique nette MWh/an du projet Perwez (Nordex N131)**

| EOLIENNES | SANS SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|--|
| E1        | 10708                      | 10455                      | 2.4%                                     |
| E2        | 10134                      | 9874                       | 2.6%                                     |
| E3        | 9905                       | 9643                       | 2.6%                                     |
| E4        | 10684                      | 10436                      | 2.3%                                     |
| E5        | 10410                      | 10157                      | 2.4%                                     |
| E6        | 10020                      | 9772                       | 2.5%                                     |
| E7        | 9963                       | 9704                       | 2.6%                                     |

**Tableau 18 Impact du module d'arrêt chauve-souris sur la production électrique nette MWh/an du projet Perwez (Servion 3.4M122)**

| EOLIENNES | SANS SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|--|
| E1        | 9585                       | 9367                       | 2.3%                                     |
| E2        | 9177                       | 8961                       | 2.4%                                     |
| E3        | 8956                       | 8734                       | 2.5%                                     |
| E4        | 9502                       | 9287                       | 2.3%                                     |
| E5        | 9275                       | 9053                       | 2.4%                                     |
| E6        | 8912                       | 8698                       | 2.4%                                     |
| E7        | 8866                       | 8644                       | 2.5%                                     |

**Tableau 19 Impact du module d'arrêt chauve-souris sur la production électrique nette MWh/an du projet Perwez (Senvion 4.2M140- Hauteur alternative)**

| EOLIENNES | SANS SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT CHIRO | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|--|
| E1        | 11480                      | 11190                      | 2.5%                                     |
| E2        | 10833                      | 10543                      | 2.7%                                     |
| E3        | 10910                      | 10617                      | 2.7%                                     |
| E4        | 11171                      | 10893                      | 2.5%                                     |
| E5        | 10805                      | 10525                      | 2.6%                                     |
| E6        | 11053                      | 10781                      | 2.5%                                     |
| E7        | 10991                      | 10701                      | 2.6%                                     |

## Module d'arrêt ombre portée

### Consignes d'arrêt

Sertius recommande de mettre en place un système d'arrêt de l'éolienne pour limiter les incidences de l'ombre portée des pales et respecter les seuils d'ombrage. La durée d'arrêt est estimée par Sertius pour chaque éolienne du parc :

**Tableau 20: module d'arrêt d'ombre portée**

| Eolienne  | Nombre d'heures d'arrêt probable par an | Pertes |
|-----------|---|--------|
| <b>E1</b> | 16h59                                   | 0.2%   |
| <b>E2</b> | 3h11                                    | 0.0%   |
| <b>E3</b> | 23h31                                   | 0.3%   |
| <b>E4</b> | 12h43                                   | 0.1%   |
| <b>E5</b> | 0h00                                    | 0.0%   |
| <b>E6</b> | 9h47                                    | 0.1%   |
| <b>E7</b> | 1h27                                    | 0.0%   |

### Hypothèses

On considère les distributions de vitesses du vent calculées à hauteur de nacelle de l'éolienne par le modèle WAsP et données au paragraphe 4.1. On ne prend pas en compte un régime de vent différent durant les périodes d'arrêt de l'éolienne par rapport à la normale annuelle ce qui revient à supposer que les pertes d'énergie sont directement proportionnelles à la durée de l'arrêt de l'éolienne.

### Résultats

Les résultats de production, sans et avec système d'arrêt ombre portée, sont présentés aux tableaux suivants pour chaque modèle d'éolienne étudié. Les pertes induites par le système d'arrêt sont mises en évidence dans la quatrième colonne.

**Tableau 21 Impact du système d'arrêt ombre portée sur la production électrique du parc (Senvion 4.2M140)**

| EOLIENNES | PRODUCTION ÉLECTRIQUE NETTE (MWh/AN) |                            | PERTES (+) OU GAIN (-)<br>DE PRODUCTION (%) |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------|---|
|           | SANS SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE           | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE |   |
| E1        | 11821                                | 11798                      | 0.2%  |
| E2        | 11176                                | 11172                      | 0.0%  |
| E3        | 10908                                | 10879                      | 0.3%  |
| E4        | 11794                                | 11777                      | 0.1%  |
| E5        | 11491                                | 11491                      | 0.0%  |
| E6        | 11052                                | 11040                      | 0.1%  |
| E7        | 10991                                | 10990                      | 0.0%  |

**Tableau 22 Impact du système d'arrêt ombre portée sur la production électrique du parc (Nordex N131)**

| EOLIENNES | PRODUCTION ÉLECTRIQUE NETTE (MWh/AN) |                            | PERTES (+) OU GAIN (-)<br>DE PRODUCTION (%) |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------|---|
|           | SANS SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE           | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE |   |
| E1        | 10708                                | 10688                      | 0.2%  |
| E2        | 10134                                | 10131                      | 0.0%  |
| E3        | 9905                                 | 9879                       | 0.3%  |
| E4        | 10684                                | 10668                      | 0.1%  |
| E5        | 10410                                | 10410                      | 0.0%  |
| E6        | 10020                                | 10009                      | 0.1%  |
| E7        | 9963                                 | 9961                       | 0.0%  |

**Tableau 23 Impact du système d'arrêt ombre portée sur la production électrique du parc (Senvion 3.4M122)**

| EOLIENNES | PRODUCTION ÉLECTRIQUE NETTE (MWh/AN) |                            | PERTES (+) OU GAIN (-)<br>DE PRODUCTION (%) |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------|---|
|           | SANS SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE           | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE |   |
| E1        | 9585                                 | 9566                       | 0.2%  |
| E2        | 9177                                 | 9174                       | 0.0%  |
| E3        | 8956                                 | 8932                       | 0.3%  |
| E4        | 9502                                 | 9488                       | 0.1%  |
| E5        | 9275                                 | 9275                       | 0.0%  |
| E6        | 8912                                 | 8902                       | 0.1%  |
| E7        | 8866                                 | 8865                       | 0.0%  |

**Tableau 24 Impact du système d'arrêt ombre portée sur la production électrique du parc (Senvion 4.2M140 Hauteur alternative)**

| EOLIENNES | PRODUCTION ÉLECTRIQUE NETTE (MWh/AN) |                            | PERTES (+) OU GAIN (-)<br>DE PRODUCTION (%) |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------|---|
|           | SANS SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE           | AVEC SYSTÈME D'ARRÊT OMBRE |   |
| E1        | 11480                                | 11457                      | 0.2%  |
| E2        | 10833                                | 10829                      | 0.0%  |
| E3        | 10910                                | 10880                      | 0.3%  |
| E4        | 11171                                | 11155                      | 0.1%  |
| E5        | 10805                                | 10805                      | 0.0%  |
| E6        | 11053                                | 11041                      | 0.1%  |
| E7        | 10991                                | 10989                      | 0.0%  |

## Combinaison bridage acoustique + module d'arrêt chauve-souris + module ombre

### Hypothèses

On fait l'hypothèse conservatrice que les pertes se cumulent : la perte cumulée s'obtient en multipliant les pertes individuelles.

### Résultats

Les résultats de production avec le bridage combiné sont présentés aux tableaux suivants pour chaque modèle d'éolienne étudié. Les pertes induites sont mises en évidence dans la quatrième colonne.

**Tableau 25 Impact du bridage cumulé sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Servion 4.2M140)**

|    | SANS BRIDAGE              | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                  | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                     | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 11821                     | 10758                                      | 9.0%                                     | 11462   | 3.0%                                     |
| E2 | 11176                     | 10686                                      | 4.4%                                     | 10926   | 2.2%                                     |
| E3 | 10908                     | 9588                                       | 12.1%                                    | 9463  | 13.2%                                    |
| E4 | 11794                     | 10324                                      | 12.5%                                    | 10654   | 9.7%                                     |
| E5 | 11491                     | 10706                                      | 6.8%                                     | 11245   | 2.1%                                     |
| E6 | 11052                     | 10504                                      | 5.0%                                     | 10801   | 2.3%                                     |
| E7 | 10991                     | 9916                                       | 9.8%                                     | 9749  | 11.3%                                    |

**Tableau 26 Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Nordex N131)**

|    | SANS BRIDAGE              | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                  | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                     | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 10708                     | 10020                                      | 6.4%                                     | 10477   | 2.2%                                     |
| E2 | 10134                     | 9843                                       | 2.9%                                     | 9892  | 2.4%                                     |
| E3 | 9905                      | 8957                                       | 9.6%                                     | 8848  | 10.7%                                    |
| E4 | 10684                     | 9647                                       | 9.7%                                     | 9777  | 8.5%                                     |
| E5 | 10410                     | 9732                                       | 6.5%                                     | 10178   | 2.2%                                     |
| E6 | 10020                     | 9762                                       | 2.6%                                     | 9786  | 2.3%                                     |
| E7 | 9963                      | 9044                                       | 9.2%                                     | 9144  | 8.2%                                     |

**Tableau 27 Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Senvion 3.4M122)**

|    | SANS BRIDAGE              | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                  | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                     | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 9585                      | 8720                                       | 9.0%                                     | 9379  | 2.1%                                     |
| E2 | 9177                      | 8563                                       | 6.7%                                     | 8942  | 2.6%                                     |
| E3 | 8956                      | 8054                                       | 10.1%                                    | 7892  | 11.9%                                    |
| E4 | 9502                      | 8523                                       | 10.3%                                    | 8498  | 10.6%                                    |
| E5 | 9275                      | 8442                                       | 9.0%                                     | 9068  | 2.2%                                     |
| E6 | 8912                      | 8273                                       | 7.2%                                     | 8703  | 2.3%                                     |
| E7 | 8866                      | 8235                                       | 7.1%                                     | 8248  | 7.0%                                     |

**Tableau 28 Impact du bridage acoustique sur la production électrique nette MWh/an du parc de Perwez (Senvion 4.2M140 Hauteur alternative)**

|    | SANS BRIDAGE              | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS GÉNÉRALES) |  | AVEC BRIDAGE CUMULÉ (CONDITIONS SECTORIELLES) |  |
|----|---------------------------|--|--|---|--|
|    | PRODUCTION NETTE (MWH/AN) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                  | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) | PRODUCTION NETTE (MWH/AN)                     | PERTES (+) OU GAIN (-) DE PRODUCTION (%) |
| E1 | 11480                     | 10451                                      | 9.0%                                     | 11116   | 3.2%                                     |
| E2 | 10833                     | 10344                                      | 4.5%                                     | 10573   | 2.4%                                     |
| E3 | 10910                     | 9587                                       | 12.1%                                    | 9463  | 13.3%                                    |
| E4 | 11171                     | 9833                                       | 12.0%                                    | 10189   | 8.8%                                     |
| E5 | 10805                     | 10274                                      | 4.9%                                     | 10548   | 2.4%                                     |
| E6 | 11053                     | 10503                                      | 5.0%                                     | 10801   | 2.3%                                     |
| E7 | 10991                     | 9915                                       | 9.8%                                     | 9782  | 11.0%                                    |

### **Appendix 3 - VALIDATION À PARTIR DES DONNÉES DE PRODUCTION DU PARC ÉOLIEN DE PERWEZ**

---

Les performances du modèle de calcul ont été validées en comparant la production observée sur 5 éoliennes existantes d'Eneco à Perwez avec la production calculée en suivant la méthodologie décrite dans cette étude.

Le parc éolien d'Eneco à Perwez comporte 8 éoliennes (5 GE77 et 3 MD77) en service depuis mars 2005 et septembre 2006 respectivement. Les éoliennes étudiées sont les 5 General Electric GE77. Ces éoliennes développent une puissance unitaire nominale de 1.5 MW et sont équipées d'un mât de 85 m. Les données transmises par le client (production & disponibilité technique mensuelle par éolienne) couvrent 4 années de production (janvier 2015 – décembre 2018).

Les données de production observées ont préalablement été analysées et traitées pour pouvoir être comparées à la production calculée par notre modèle. La procédure de traitement des données comporte les étapes suivantes :

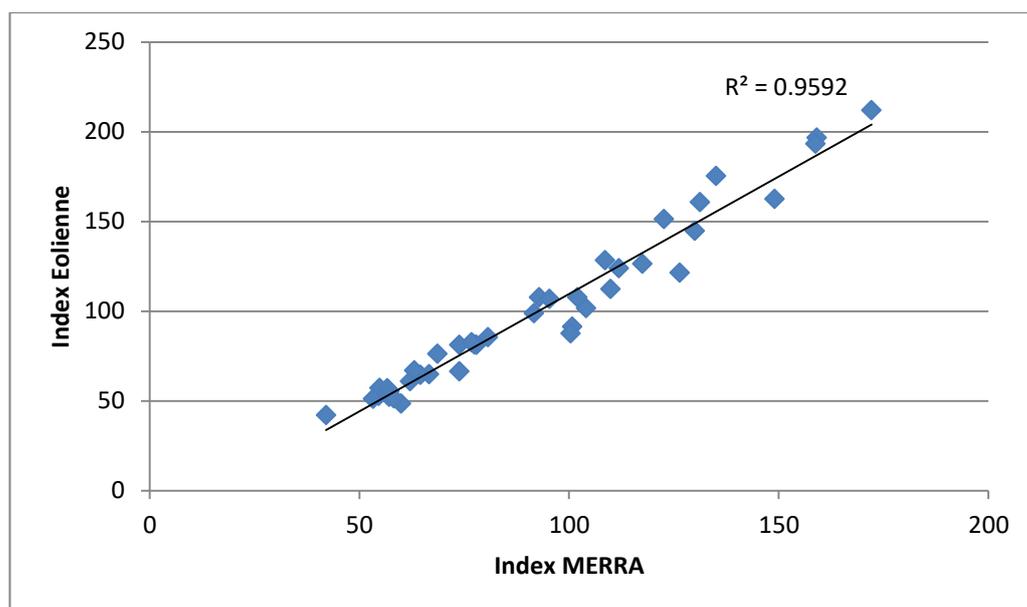
- Test de plausibilité sur les données de production et si requis filtrage des données incohérentes
- Ajustement des données de production pour tenir compte des périodes d'indisponibilité technique de l'éolienne et obtenir 100 % de disponibilité
- Ajustement des données de production par index de vent pour normaliser la production sur une période de minimum 10 ans
- Evaluation et déduction des pertes de production afin d'obtenir la production électrique nette du parc éolien

Les données mensuelles de production ont été premièrement contrôlées en réalisant des tests de plausibilité entre les données et filtrées en cas d'incohérence. Toutes les données avec un taux de disponibilité technique de l'éolienne inférieur à 97% ont été écartées. Les données restantes ont ensuite été corrigées pour estimer les valeurs de production avec une disponibilité de 100%.

Les données de production ont ensuite été ajustées à l'aide d'un index de vent pour tenir compte de la variabilité du vent et normaliser la production. L'index de vent a été calculé pour la Belgique à partir des données météorologiques MERRA2 sur 27 ans (1992-2018) : il indique le niveau de production d'une éolienne sur une période donnée par rapport à la normale de vent (index 100 = production moyenne sur les 27 dernières années).

Les corrélations entre l'index de vent calculé pour la Belgique et les données de production de Perwez ont été contrôlées et s'avèrent de bonne qualité pour l'ensemble des éoliennes du parc ( $R^2 > 0.95$ ) : on peut considérer que l'index de vent reproduit de manière fiable les variations de production du parc éolien de Perwez au fil du temps.

**Tableau 29 Exemple de corrélation entre les index de vent et les données de production - Eolienne n°5**



La production observée ainsi ajustée est comparée à la production calculée à partir du modèle WAsP.

Les performances du modèle de prédiction sont analysées à l'aide d'un indice de convergence défini comme le rapport entre la production calculée par le modèle et la production observée à partir des données de production :

$$\text{Indice Convergence} = \text{Production Calculée} / \text{Production Observée}$$

**Tableau 30 Comparatif entre la production calculée à partir de WASP et les données de production du parc éolien de Perwez**

|                                      | MODELE PRÉVISION WASP     | DONNÉES DE PRODUCTION APRÈS NORMALISATION |
|--------------------------------------|---------------------------|---|
| Modèle d'éolienne                    | GE77                      | GE77                                      |
| Nombre d'éoliennes                   | 5                         | 5   |
| Diamètre du rotor (m)                | 77                        | 77  |
| Hauteur de mât (m)                   | 85                        | 85  |
| Puissance éolienne (MW)              | 1.5                       | 1.5                                       |
| Puissance installée du parc (MW)     | 7.5                       | 7.5                                       |
| Production électrique brute (MWh/an) | 16339                     | 16835                                     |
| Pertes de productions :              |                           |   |
| - Effet de sillage                   | - Inclus production brute | - Inclus production brute                 |
| - Indisponibilité technique éolienne | - 3%                      | - 3%                                      |
| - Indisponibilité raccordement       | - 0.3%                    | - 0.3%                                    |
| - Indisponibilité réseau             | - 0.3%                    | - 0.3%                                    |
| - Pertes électrique                  | - 2%                      | - 2%                                      |
| - Formation glace                    | - 0.5%                    | - Inclus production brute                 |
| - Hystérèse vent fort                | - 0.0%                    | - 0.0%                                    |
| Production électrique nette (MWh/an) | 15361                     | 15907                                     |
| Indice de convergence (%)            |                           | 96.6                                      |

On observe une bonne concordance entre les résultats du modèle WASP et les données de production normalisées, avec un modèle de calcul qui sous-estime de 3.4% la production électrique observée. Au vu des incertitudes liées à la courbe de puissance de l'éolienne et au processus de normalisation des données de production, on peut conclure que le modèle est en mesure de prédire correctement la production du parc en projet et qu'aucune correction du modèle n'est requise à l'issue du test de validation.

Validation à partir des données de production du parc éolien de Perwez

## Appendix 4 - MONOTONE DE PRODUCTION DU PROJET DE REPOWERING

Le monotone de production du projet de repowering est illustré à la figure suivante pour un parc éolien de 29.4 MW (7 éoliennes Senvion 3.4M140 sur des mâts de 110m) :

- La puissance débitée par le parc éolien n'est jamais supérieure à 28.8 MVA si l'on considère les pertes par effet de sillage et les pertes électriques jusqu'au poste d'injection Ores
- La puissance débitée par le parc éolien est supérieure à 10 MVA pendant plus de 3200 heures par an

**Figure 6 Monotone de production brute (moins effet de sillage) avec 7 éoliennes Senvion 3.4M140 HH110m**

