KohleNusbaumer SA

« BEL COSTER »

Mesures de vent et prévision énergétique pour
le parc éolien « Bel Coster »

KohleNusbaumer SA – Version 5.0

Numéro de la version	**Date de l'édition**
Version 5.0	14 décembre 2016

KohleNusbaumer SA
Chemin de Mornex 6
1003 Lausanne
Tél. 021 341 27 46
info@kn-sa.ch
www.kn-sa.ch

Sommaire

Sommaire 1

1 Site et campagnes de mesures 2
1.1 Emplacements 2
1.2 Choix des méthodes de mesure 3
1.3 Protocole des stations de mesures 4

2 Résultats des mesures 5
2.1 Vitesses moyennes et distributions des vitesses de vent 5
2.2 Profils de vent 5

3 Modélisation, vitesses et productions 6
3.1 Modèle 6
3.2 Vitesses moyennes 6
3.3 Prévisions de production 8

1 Site et campagnes de mesures

1.1 Emplacements

Le projet « Bel Coster » prévoit l'installation de 9 éoliennes sur les territoires des communes de Ballaigues, Lignerolle et L'Abergement, au nord-est de la ville de Vallorbe. Dans le cadre de ce projet, quatre mesures SODAR[1] et une mesure sur un mât de 100 mètres de hauteur ont été mises en œuvre sur le site. Le présent document présente les résultats de ces mesures de vent ainsi qu'une estimation du productible du parc, basée sur une modélisation du vent.

La carte de la Figure 1 permet de localiser l'emplacement des stations de mesure et des éoliennes liées au projet, alors que le Tableau 1 en donne les coordonnées.

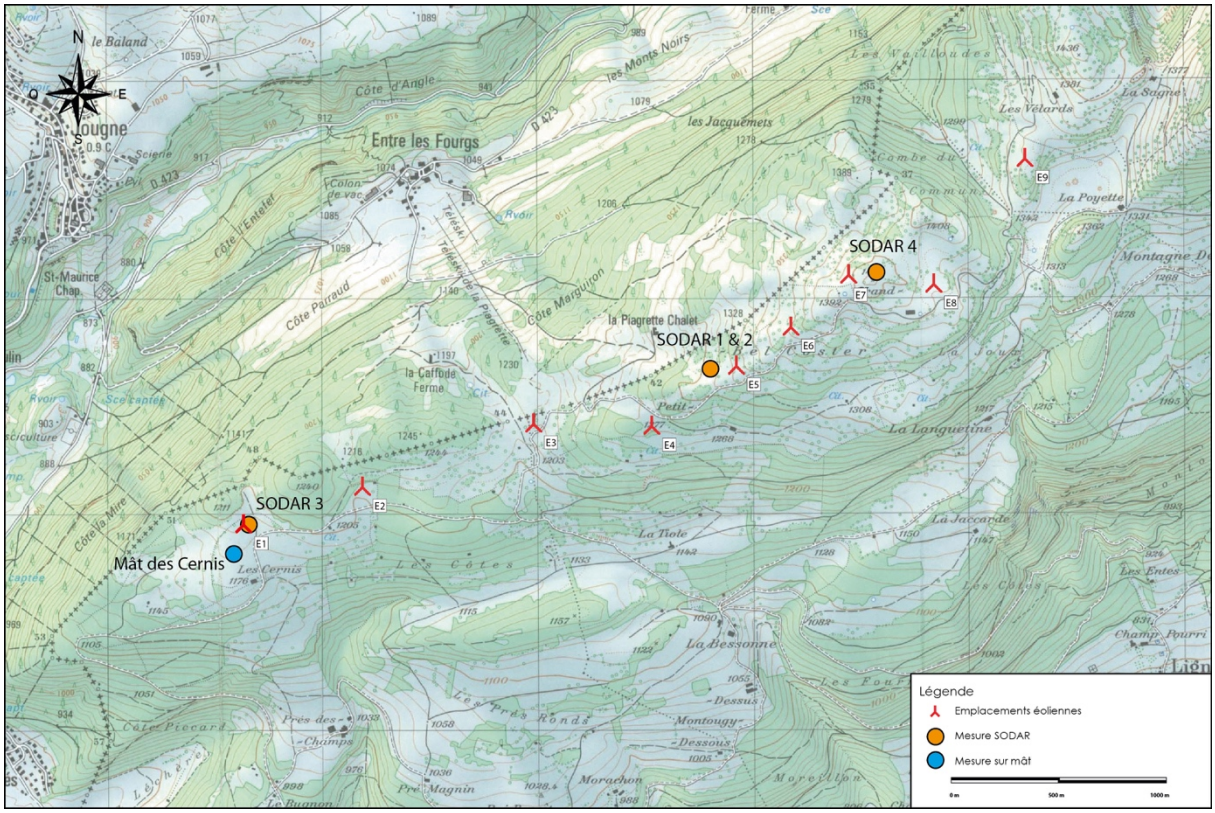


Figure 1 : Emplacements des stations de mesure et des éoliennes considérées dans le cadre du projet « Bel Coster ». Le site s'étire sur une crête d'environ 4,5 km de long. L'anémomètre de référence pour l'extrapolation à long terme, nommé « Anémo La Dôle », se trouve à 40 km au sud-ouest du site et n'est donc pas représenté sur la carte.

[1] Le SODAR, acronyme pour „Sonic Detection and Ranging", est un appareil de télédétection en météorologie basé sur l'analyse d'ondes sonores.

Tableau 1 : Coordonnées des stations de mesure et des éoliennes liées au projet.

Emplacement	Coordonnée E [m]	Coordonnée N [m]	Altitude du sol [m]
SODAR 1 et SODAR 2	522'816	178'667	1'305
SODAR 3	520'666	177'946	1'190
SODAR 4	523'556	179'098	1'415
Mât des Cernis	520'600	177'820	1'182
Anémo La Dôle	497'061	142'362	1'670
E1	520'633	177'951	1'190
E2	521'184	178'121	1'208
E3	521'980	178'411	1'220
E4	522'527	178'398	1'272
E5	522'921	178'674	1'323
E6	523'176	178'854	1'361
E7	523'443	179'093	1'396
E8	523'840	179'050	1'381
E9	524'265	179'627	1'361

Figure 2 : A gauche : vue de l'emplacement du SODAR 1 et 2. A droite : vue du mât des Cernis.

1.2 Choix des méthodes de mesure

La topographie du site, bien qu'en position de crête, est assez accidentée. La présence de la forêt influe sur le vent jusqu'à environ 100 m de hauteur. Dès lors, le site nécessitera l'emploi de mâts d'éoliennes très hauts afin d'obtenir des rendements conséquents en termes de production d'électricité. Pour enregistrer les vitesses de vent à hauteur de moyeu, des mesures SODAR ont été mises en œuvre en complément à la mesure sur mât, limitée à 100 m de hauteur.

Les données issues des mesures sur les mât des Cernis, des SODARs et de la station de référence SwissMetNet de La Dôle (Anémo La Dôle) ont été utilisées afin d'effectuer une modélisation du vent pour le site.[2]

[2] Selon " MEASNET Procedure : Evaluation of Site Specific Wind Conditions. Version 1, November 2009."

1.3 Protocole des stations de mesures

Le Tableau 2 montre la configuration des stations de mesure mises en œuvre dans le cadre du projet « Bel Coster ». La station de référence SwissMetNet de La Dôle est ici nommée « Anémo La Dôle ». Le mât situé à l'extrémité ouest du site (mât des Cernis) est équipé d'anémomètres, de girouettes et de divers capteurs météorologiques (température, humidité, etc.) et répond au protocole MEASNET.

Tableau 2 : Configuration des stations de mesure de vent.

Paramètres	SODAR 1	SODAR 2	SODAR 3	SODAR 4	Mât des Cernis	Anémo La Dôle
Appareil	SODAR SFAS[3]	SODAR SFAS	SODAR SFAS	SODAR SFAS	Anémomètres, girouettes	Anémomètres, girouettes
Hauteur min. de la mesure	40 m	40 m	50 m	50 m	60 m	10 m
Hauteur max. de la mesure	150 m	150 m	200 m	200 m	100 m	10 m
Intervalle de hauteur mesuré	5 m	5 m	5 m	5 m	20 m	-
Moyenné sur	10 min	10 min	10 min	10 min	10 min	10 min

Le protocole des mesures entreprises est donné dans le Tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Protocole des mesures de vent.

Paramètres	SODAR 1	SODAR 2	SODAR 3	SODAR 4	Mât des Cernis	Anémo La Dôle
Mise en service	15.05.2008	17.11.2011	02.02.2015	09.07.2016	02.02.2016	01.01.2006
Fin de la mesure	05.11.2008	31.05.2012	11.05.2016	28.10.2016	En cours	En cours
Jours utiles	143	182	100	82	269	10 ans

Les disponibilités des données brutes dans le cadre des mesures effectuées pour le projet « Bel Coster » sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Disponibilité des données brutes suivant la hauteur de mesure.

Hauteur de la mesure	SODAR 1	SODAR 2	SODAR 3	SODAR 4	Mât des Cernis	Anémo La Dôle
10 m	-	-	-	-	-	99 %
60 m	86 %	96 %	95 %	93 %	92 %	-
80 m	86 %	96 %	95 %	90 %	96 %	-
100 m	80 %	94 %	93 %	84 %	92 %	-
135 m	53 %	90 %	90 %	75 %	-	-
150 m	40 %	89 %	87 %	70 %	-	-

[3] Scintec, modèle SFAS (Small Flat Array Sodar).

2 Résultats des mesures

2.1 *Vitesses moyennes et distributions des vitesses de vent*

Les vitesses moyennes mesurées pour les différentes stations sur la durée de leurs mesures effectives sont données dans le Tableau 5.

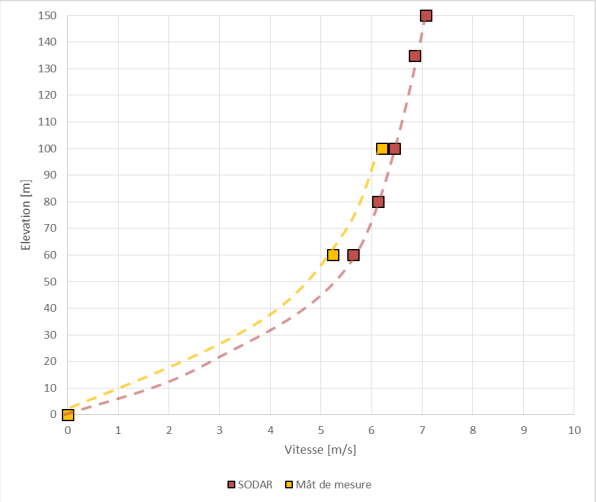
Tableau 5 : Comparaison des vitesses moyennes mesurées aux différentes stations de mesure, avec vitesse moyenne sur la même période mesurée à l'anémomètre de référence, Anémo La Dôle. Les faibles disponibilités des données pour la mesure SODAR 1 dès 100 m et pour SODAR 4 dès 135 m font que les vitesses moyennes mesurées contiennent une incertitude élevée.

	60 m	80 m	100 m	135 m	150 m	Anémo La Dôle (10 m)
SODAR 1 (143 jours)	4,9	5,2	(5,9)	(7,2)	(7,9)	7,1
SODAR 2 (182 jours)	5,5	6,1	6,7	7,2	7,7	8,4
SODAR 3 (100 jours)	5,6	6,1	6,5	6,9	7,1	8,6
SODAR 4 (82 jours)	5,8	6,0	6,1	(6,4)	(6,6)	6,2
Mât des Cernis (269 jours)	4,4	4,7	5,2	-	-	7,1

À noter que la vitesse moyenne sur 10 ans d'Anémo La Dôle est de 7,3 m/s.

2.2 *Profils de vent*

La Figure 3 montre le cisaillement du vent obtenu grâce aux données SODAR 3 et à celle du Mât de mesure, pour la période où les mesures ont pu se dérouler en parallèle (100 jours). L'altitude de l'emplacement de la mesure SODAR 3 est d'environ 5 à 7 m plus élevée que celle de l'emplacement du mât des Cernis. Malgré cette légère différence, les deux mesures présentent des profils similaires. Pour le mât des Cernis, les vitesses de vent à 80 m, enregistrées par un anémomètre à coupelles non chauffé, n'ont pas été utilisées à cause de la présence de gel durant la période considérée.



Élévation [m]	Vitesse mesurée [m/s]	
	SODAR 3	Mât des Cernis
60	5,6	5,2
80	6,1	-
100	6,5	6,2
135	6,9	-
150	7,1	-

Figure 3 : Cisaillement du vent pour les mesures issues de SODAR 3 et du mât des Cernis durant la période de mesure en parallèle.

3 Modélisation, vitesses et productions

3.1 Modèle

Les données des mesures effectuées sur le site ont été corrigées à long terme grâce à une méthode de régression, en utilisant les données provenant de la station de référence de La Dôle entre le 01.01.2006 et le 30.11.2016. Les données mesurées à plus de 80 m au-dessus du niveau du sol pour SODAR 1 n'ont pas été conservées, leurs disponibilités étant trop faibles pour leur assurer une fiabilité suffisante (voir Tableau 4). Il en est de même pour les données mesurées à plus de 100 m pour SODAR 4.

La modélisation affecte une pondération bien plus importante aux mesures entreprises à l'ouest du site (mât des Cernis et SODAR 3) par rapport aux autres mesures (SODAR 1, 2 et 4).

Les conditions de vent sur le site ont été modélisées en utilisant WAsP 10.1. Ce logiciel calcule les vitesses moyennes à long terme sur l'ensemble du site et à différentes hauteurs, ce qui permet par la suite d'effectuer des prévisions de productions électriques pour chaque emplacement, en fonction d'un modèle déterminé d'éoliennes.

Un modèle numérique de terrain (MNT 25) acquis auprès de Swisstopo a été utilisé pour modéliser l'orographie du site et de ses alentours, sur 43 km x 23 km, alors qu'une rugosité de terrain a été appliquée pour le site lui-même, sur 7 km x 5 km, avec les classes de rugosité R_k suivantes :

- Forêts : $R_k = 3$;
- Pâturages : $R_k = 2{,}5$.

3.2 Vitesses moyennes

Le Tableau 6 montre les vitesses moyennes modélisées à 135 m et 150 m au-dessus du niveau du sol pour les emplacements des éoliennes.

Tableau 6 : Vitesses moyennes à long terme calculées par la modélisation pour les neuf emplacements.

Vitesse moyenne	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
à 135 m [m/s]	6,3	6,3	5,9	6,1	5,9	6,6	6,9	6,7	6,1
à 150 m [m/s]	6,4	6,4	6,1	6,3	6,1	6,8	7,0	6,9	6,3

Selon les directives cantonales[4], la vitesse moyenne annualisée des vents à la hauteur des moyeux doit être supérieur à 5 m/s à l'emplacement de chaque éolienne, ce qui est le cas ici.

Des représentations graphiques des vitesses de vent modélisées sur le site sont données dans la Figure 4 pour une hauteur de 135 m au-dessus du sol et dans la Figure 5 pour 150 m.

[4] "Directives cantonales pour l'installation d'éoliennes de hauteur totale supérieure à 30 mètres", V. 3.3, juillet 2013.

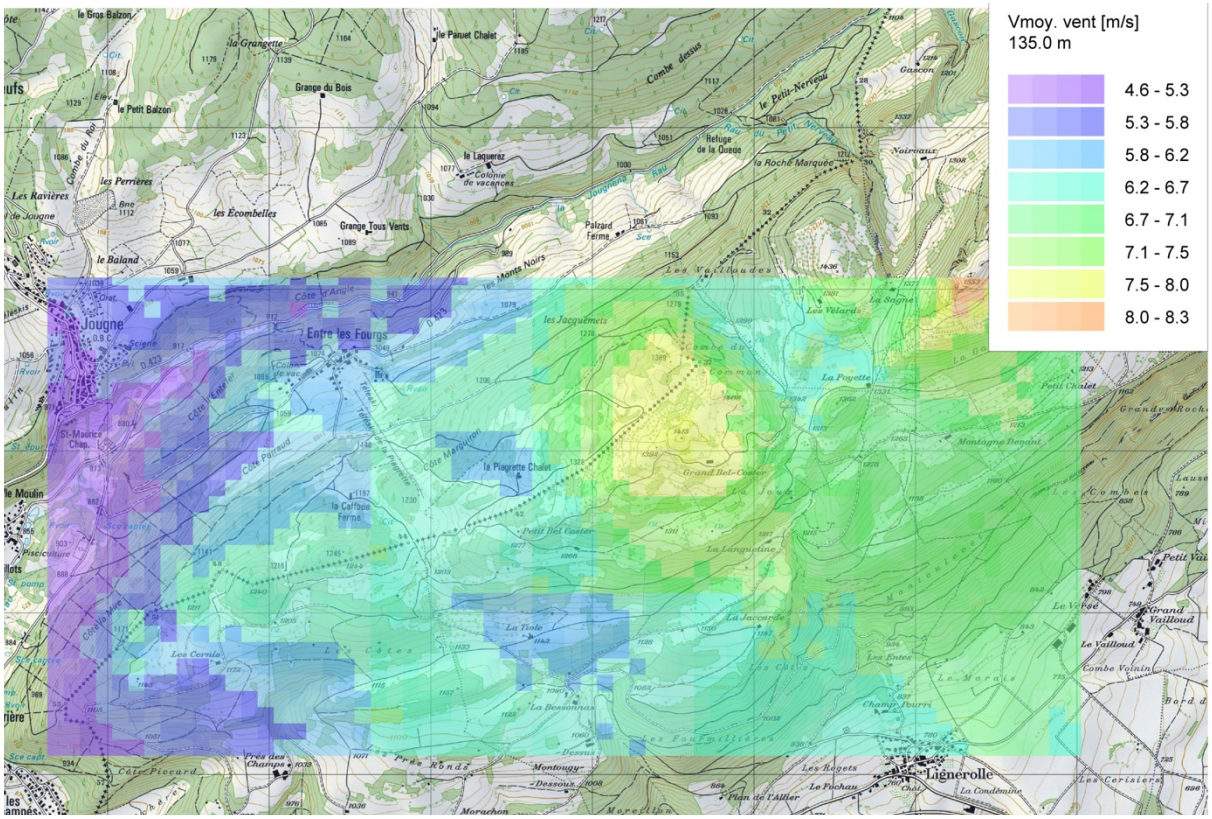


Figure 4 : Modélisation des vitesses moyennes à 135 m au-dessus du sol dans la région du projet.

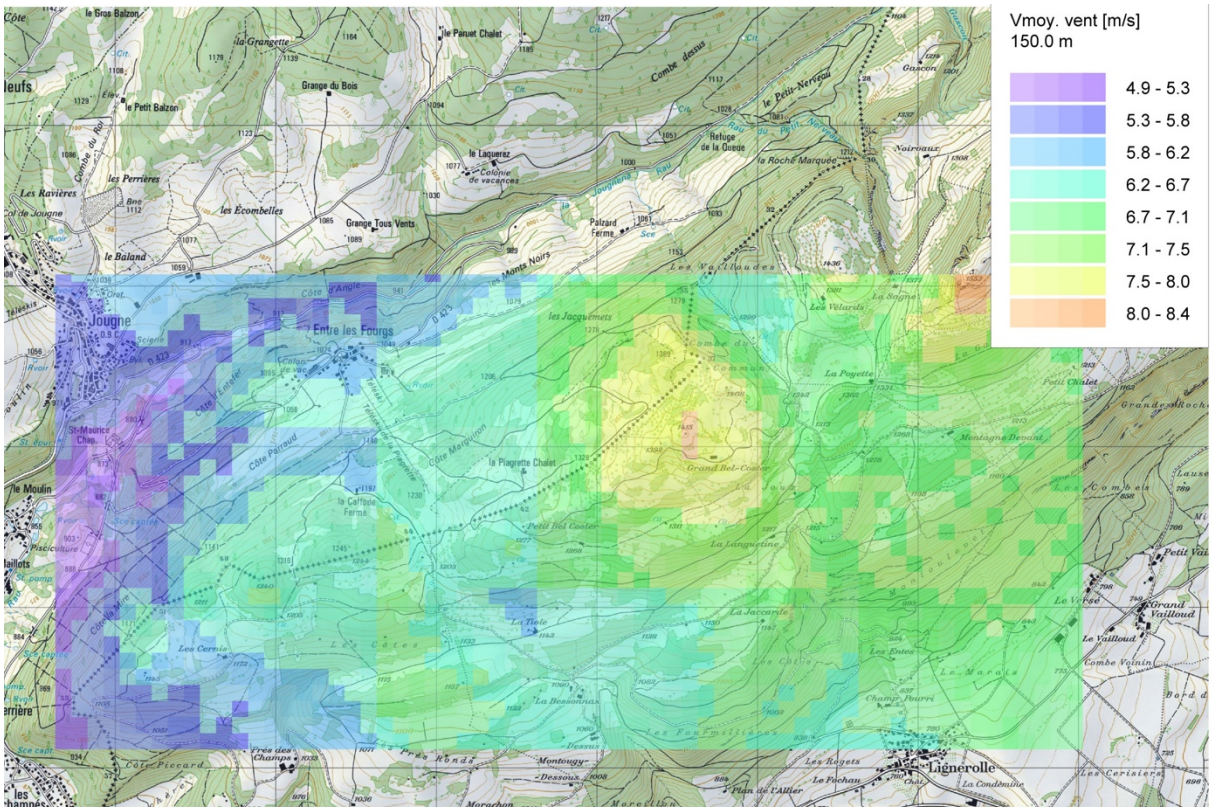


Figure 5 : Modélisation des vitesses moyennes à 150 m au-dessus du sol dans la région du projet.

3.3 Prévisions de production

La production annuelle nette du parc, estimée d'après la modélisation de vent, est comprise entre 65 et 80 millions de kWh par année, en fonction du type définitif d'éoliennes qui sera choisi. Cette prévision est conservatrice, donnant un poids prépondérant aux mesures effectuées proche de l'emplacement 1.

A titre d'exemple, un projet constitué de 9 éoliennes du type Enercon E-115, de puissance unitaire de 3,2 MW et montées sur des mâts de 149 m de haut, devrait donner une production annuelle brute d'environ 77 GWh, pour un productible net de 66 GWh (Tableau 7). Ce modèle E-115 est une évolution moins bruyante du modèle E-101. L'utilisation d'éoliennes dotées de plus grands rotors et de générateur plus puissants, comme par exemple l'Enercon E-126 de 4,2 MW, même sur des mât plus courts (135 m), permettrait d'atteindre une production totale brute de 87 GWh/an, pour un productible net de 75 GWh (Tableau 8).

Tableau 7 : Production électrique estimée pour un projet constitué de 9 éoliennes du type Enercon E-115, de 3,2 MW, sur des mâts de 149 m. Il s'agit de prévisions moyennes (P50).

Eolienne n° Type Puissance Hauteur de mât	E1 E-115 3'200 kW 149 m	E2 E-115 3'200 kW 149 m	E3 E-115 3'200 kW 149 m	E4 E-115 3'200 kW 149 m	E5 E-115 3'200 kW 149 m	E6 E-115 3'200 kW 149 m	E7 E-115 3'200 kW 149 m	E8 E-115 3'200 kW 149 m	E9 E-115 3'200 kW 149 m
Vitesse moyenne à hauteur de la nacelle [m/s]	6,4	6,4	6,1	6,3	6,1	6,8	7,0	6,9	6,3
Prévision énergétique brute E_{P50} [GWh/an]	8,5	8,5	7,5	8,1	7,5	9,3	9,9	9,5	7,9
Pertes par effet parc	2,7 %	4,3 %	4,9 %	6,3 %	7,3 %	10,8 %	9,8 %	6,5 %	3,5 %
Déduction pour disponibilité	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %
Pertes transformateur et lignes	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %
Prévision énergétique nette E_{P50} [GWh/an]	7,6	7,4	6,6	6,9	6,3	7,6	8,1	8,1	7,0

Tableau 8 : Production électrique estimée pour un projet constitué de 9 éoliennes du type Enercon E-141, de 4,2 MW, sur des mâts de 135 m. Il s'agit de prévisions moyennes (P50).

Eolienne n° Type Puissance Hauteur de mât	E1 E-126 4'200 kW 135 m	E2 E-126 4'200 kW 135 m	E3 E-126 4'200 kW 135 m	E4 E-126 4'200 kW 135 m	E5 E-126 4'200 kW 135 m	E6 E-126 4'200 kW 135 m	E7 E-126 4'200 kW 135 m	E8 E-126 4'200 kW 135 m	E9 E-126 4'200 kW 135 m
Vitesse moyenne à hauteur de la nacelle [m/s]	6,3	6,3	5,9	6,1	5,9	6,6	6,9	6,7	6,1
Prévision énergétique brute E_{P50} [GWh/an]	9,7	9,6	8,4	9,1	8,4	10,7	11,4	10,9	8,9
Pertes par effet parc	2,3 %	3,8 %	4,1 %	5,5 %	5,9 %	9,4 %	8,9 %	5,8 %	3,1 %
Déduction pour disponibilité	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %	5.0 %
Pertes transformateur et lignes	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %	3.0 %
Prévision énergétique nette E_{P50} [GWh/an]	8,7	8,5	7,4	7,9	7,2	8,8	9,5	9,4	7,9

Remarques :

Le bureau KohleNusbaumer SA confirme par la présente avoir exécuté son mandat selon ses meilleures connaissances et sur la base de l'état actuel des connaissances. Concernant les prévisions énergétiques, des risques résiduels ne peuvent être exclus. Ces risques non négligeables pourraient être dus en particulier à la méthode de mesure et aux éventuels changements climatiques pouvant apparaître.