



## Rapport final

---

# Efficacité des Trailing Edge Serration (TES)

Mesurage de l'efficacité acoustique de  
dentelures de bord de fuite (TES) sur les  
éoliennes à St-Brais





HAUTE ÉCOLE  
D'INGÉNIERIE ET DE GESTION  
DU CANTON DE VAUD  
[www.heig-vd.ch](http://www.heig-vd.ch)

**Date :** 27 avril 2018

**Lieu :** Berne

**Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme de recherche énergétique  
CH-3003 Berne  
[www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)  
[energieforschung@bfe.admin.ch](mailto:energieforschung@bfe.admin.ch)

**Cofinancement :**

Département du territoire et de l'environnement (DTE)  
Direction générale de l'environnement (DGE)  
Ch. des Boveresses 155  
1066 Epalinges

ADEV Energiegenossenschaft  
Kasernenstrasse 63  
Postfach 550  
4410 Liestal

**Mandataires :**

PRONA SA  
Rue du Valentin 18  
Case postale 1106  
CH-1401 Yverdon-les-Bains  
[www.prona.ch](http://www.prona.ch)

Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud  
CH-1401 Yverdon-les-Bains  
[heig-vd.ch](http://heig-vd.ch)

**Auteurs :**

Dr. Xavier Falourd, PRONA SA, [x.falourd@prona.ch](mailto:x.falourd@prona.ch)  
Dr. Lukas Rohr, PRONA SA, [l.rohr@prona.ch](mailto:l.rohr@prona.ch)

**Responsable de domaine OFEN :** Katja Maus, [katja.maus@bfe.admin.ch](mailto:katja.maus@bfe.admin.ch)  
**Chef de programme de l'OFEN :** Lionel Perret, [lionel.perret@planair.ch](mailto:lionel.perret@planair.ch)  
**Numéro du contrat de l'OFEN :** SI/501633-01



## Résumé

La société ADEV exploite deux éoliennes à St-Brais (JU). Étant donné la topographie particulière et la proximité des habitations, le bruit des éoliennes est clairement audible même si les valeurs limites d'immission sont respectées. Pour pallier à cet effet, un système de dentelures de bord de fuite (TES) a été installé sur chacune des pales des éoliennes à la fin du printemps 2017.

Le but principal de l'étude était de quantifier l'efficacité des TES, efficacité mesurée aux distances IEC61400-11 :2012 à proximité des éoliennes. Le protocole de mesurage et l'ensemble des données collectées ont permis d'extraire des statistiques fiables pour tous les régimes de fonctionnement des éoliennes. La comparaison des niveaux sonores par classe de vitesse de vent avant et après installation des dentelures de bord de fuite (TES) montre que la réduction du niveau sonore du bruit éolien se situe entre 2 dB et 4 dB à l'émission pour les régimes de vent supérieurs 6m/s à hauteur de nacelle.

Mandat **P17165**

Yverdon-les-Bains, le 27 avril 2018

**Bruit éolien – Mesure d'efficacité des TES – ADEV – St-Brais**

---

## **Efficacité des Trailing Edge Serration (TES) Rapport complémentaire DGE-VD / OFEN – V2**



Sur mandat de:

ADEV Windkraft AG  
Kasernenstrasse 63  
Postfach 550  
4410 Liestal

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Principe de qualification du bruit éolien.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Protocole de mesurage acoustique .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Données opérationnelles - SCADA.....</b>	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>Roses des vents SCADA – Phase n°1 .....</b>	<b>6</b>
<b>4.2</b>	<b>Roses des vents SCADA – Phase n°2 .....</b>	<b>6</b>
<b>4.3</b>	<b>Statistiques SCADA – Phase n°1 .....</b>	<b>7</b>
<b>4.4</b>	<b>Statistiques SCADA – Phase n°2 .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Evaluations par phase d'arrêt.....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Analyses statistiques à l'émission .....</b>	<b>10</b>
<b>6.1</b>	<b>Statistiques WEA n°1 ouest) et WEA n°2 (est).....</b>	<b>10</b>
<b>6.2</b>	<b>Statistiques sur l'efficacité des TES.....</b>	<b>11</b>
<b>6.3</b>	<b>Spectres et efficacité des TES .....</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Statistiques à l'émission et l'immission.....</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>Remarques sur l'évaluation de d'audibilité.....</b>	<b>17</b>
<b>9</b>	<b>Bridage nocturne .....</b>	<b>19</b>
<b>10</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>19</b>

## Tableaux

Tableau 1: Correspondance des sites et des périodes et type de sonomètres.....	4
Tableau 2: Niveaux sonores LAeq (1 min) et L90 pour les deux périodes et pour chaque site de mesurage. ....	14
Tableau 3: Evaluation de l'efficacité du bridage nocturne - 6 mai 2017 .....	19

## Figures

Figure 1: Positions des sonomètres.....	5
Figure 2: Photographies des points de mesure de type IEC61400-11.....	5
Figure 3: Photographies des points de mesure LUS Nord (à gauche) et LUS Sud (à droite). Le microphone extérieur est situé dans une cagette recouverte d'un tissu acoustique.....	5
Figure 4: Roses des vents de la phase n°1, données SCADA – mesurages du vent à hauteur de la nacelle (h = 78 m). A gauche WEA1 (ouest), à droite WEA2 (est) .....	6
Figure 5: Roses des vents de la phase n°2, données SCADA – mesurages du vent à hauteur de la nacelle (h = 78 m).. A gauche WEA1 (ouest), à droite WEA2 (est) .....	7
Figure 6: Statistiques SCADA - Phase n°1 .....	7
Figure 7: Statistiques SCADA - Phase n°2 .....	8
Figure 8: Rapport de mesurage du bruit éolien au point IEC-WEA1 pour une séquence d'arrêts (arrêts figurés par les courbes RPM à 0).....	9
Figure 9: Statistiques brutes de l'éolienne WEA1 (Ouest) - mesurages acoustiques classés selon les données RPM SCADA. ....	10

Figure 10: Statistiques brutes de l'éolienne WEA2 (Est) - mesurages acoustiques classés selon les données RPM SCADA .....	10
Figure 11: Comparaison des niveaux sonores des éoliennes WEA1 (Ouest) et WEA2 (Est) avant et après installation des TES. ....	11
Figure 12: Statistiques moyennes des éoliennes WEA1 (Ouest) et WEA2 (Est) – En haut : comparaison des niveaux sonores avant et après installation des TES : en bas : estimation statistiques des efficacités. WEA1 est l'éolienne de référence pour l'estimation (pas de bridage nocturne lors de la première phase au contraire de WEA2).12	12
Figure 13: Spectres aux distances IEC61400-11 avant et après installation des TES .....	13
Figure 14: Spectres aux LUS avant et après installation des TES.....	14
Figure 15: Statistiques des niveaux sonores L90 (1 minute). À gauche, phase n°1; à droite phase n°2. En couleur les estimations du bruit éolien total et des bruits éoliens WEA1 et WEA2. En noir la courbe d'approximation du bruit éolien selon ISO9613-2. La vitesse du vent est mesurée à hauteur de nacelle (h=78 m). ....	16
Figure 16: Evaluation de la vitesse de rotation instantanée par analyse audio. En bleu et cyan les valeurs max et min des données SCADA; en rose les valeurs RPM instantanées issues du traitement audio. ....	17
Figure 17: Evaluation de la vitesse de rotation RPM par analyse audio sur les données sonométriques du LUS Nord - Phase n°2 .....	18
Figure 18: Statistiques Phase 1 : RPM vs vitesse vent.....	26
Figure 19: Statistiques Phase 2 : RPM vs vitesse vent.....	26
Figure 20: Comparaison des niveaux sonores des éoliennes WEA1 (Ouest) et WEA2 (Est) avant et après installation des TES .....	27
Figure 21: Haut: Niveaux sonores LAeqmin (1minute) selon vitesse de vent; bas: efficacité des TES vs vitesse de vent.....	28
Figure 22: Données de puissances acoustiques ENERCON E82 .....	29
Figure 23: Evaluation de la vitesse de rotation RPM par analyse audio sur les données sonométriques du LUS Sud - Phase n°2 .....	33

## Annexes

A1 – Rapport WEA2 – Phase n°1 – bridage nocturne
A2 – Rapport sonométrique à l'émission WEA2 – Phase n°2
A3 – Rapport sonométrique à l'émission WEA1– Phase n°2
A4 – Rapport à l'immission LUS Sud – Phase n°2
A5 – Rapport à l'immission LUS Nord– Phase n°2
A6 – Statistiques SCADA Phase n°1
A7 – Statistiques SCADA Phase n°2
A8 – Comparaison LAeqmin vs RPM ou Vitesse vent
A9 – Efficacité des TES - LAeqmin vs Vitesse vent
A10 – Spectre ENERCON E-82
A11 – Statistiques LAeq vs Vitesse vent
A12 – Statistiques L90 vs Vitesse vent
A13 – Statistiques LAeqmin vs Vitesse vent
A14 – Statistiques LAeq vs Power
A15 – Statistiques L90 vs Power
A16 – Statistiques LAeqmin vs Power

## Bases légales

- [1] Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) du 15 décembre 1986
- [2] Loi sur la protection de l'environnement (LPE) du 7 octobre 1983

## Références bruit éolien de l'équipe PRONA / HEIG-VD

- [3] Rapport « Bruit à l'émission – Charrat VS » 2013-2015 –mars 2016
- [4] Rapport « Bruit à l'immission – EolJorat Sud » - mars 2016
- [5] Réalisation du « Gabarit sonore éolien – Eoljorat Sud », novembre 2016.
- [6] X. Falourd, expert pour l'OFEN auprès de IEAWIND Task 39 – Dublin, Oct. 2017

## Documentation de référence

- [7] Proceedings Wind Turbine Noise 2015, 2017
- [8] IEC61400-11:2012 « Wind Turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques »
- [9] « Wind Turbine Noise », D. Bowdler and G. Leventhall 2012



## 1 Introduction

La société ADEV exploite deux éoliennes à St-Brais. Étant données la topographie particulière et la proximité des habitations, le bruit des éoliennes est clairement audible même si les valeurs limites d'immission sont respectées. Pour pallier à cet effet, un système de dentelures de bord de fuite (TES) a été installé sur chacune des pales des éoliennes à la fin du printemps 2017. Le but de ce projet est de contrôler leurs efficacités acoustiques par des mesurages de contrôle.

## 2 Principe de qualification du bruit éolien

Les phases n°1 (printemps 2017) et n°2 (automne 2017) effectuée avant et après l'installation des TES ont permis de collecter les données acoustiques, météorologiques et les données SCADA des deux éoliennes.

Les mesurages acoustiques à proximité des éoliennes (aux distances IEC61400-11 :2012) et en deux lieux d'immission (à environ 465 m et 565 de l'éolienne la plus proche) permettent de caractériser le bruit de chaque éolienne selon un protocole de mesurage continu du bruit éolien pour deux phases d'environ 25 jours. Les mesurages acoustiques aux lieux d'immission servent aussi à qualifier l'audibilité du bruit de l'éolienne Ouest (WEA2) en période nocturne essentiellement et lors des jours de week-end.

Pour chaque phase de mesurage en collaboration avec ENERCON, quelques arrêts provoqués en alternance des deux éoliennes permettent de discriminer le bruit de chaque éolienne du bruit ambiant pour différentes classes de vent et ainsi d'opérer des mesurages de contrôle selon un protocole proche de celui de la norme IEC61400-11 :2012 et de vérifier l'audibilité du bruit éolien aux lieux d'immission.

Le but principal de l'étude étant de quantifier l'efficacité des TES, l'ensemble des données collectées permet d'effectuer des statistiques pour presque tous les régimes de fonctionnement des éoliennes (rpm et orientation). La comparaison des niveaux sonores par classe de rpm avant et après installation des dentelures de bord de fuite (TES) aux distances IEC61400-11 permet de quantifier la réduction obtenue du niveau sonore du bruit éolien à l'émission mais aussi à l'immission (par extrapolation sur la propagation et/ou mesurage).

## 3 Protocole de mesurage acoustique

Quatre sonomètres sont utilisés pour effectuer les mesurages simultanés du bruit à l'émission (à distance IEC61400-11) et du bruit à l'immission. Le Tableau 1 décrit le matériel utilisé pour la mesure. Les sonomètres récoltent en continu les niveaux sonores LAeq, Leq, et les niveaux sonores par bande de tiers d'octave (de 6.3 Hz à 20 kHz) ainsi que les enregistrements audio. Les positions des sonomètres pour les deux phases de mesurage sont similaires avec une précision d'environ deux mètres.

Phase / Période	Phase 1 / Période 1	Phase 1 / Période 2	Phase 2 / Période 1 Hors calibre	Phase 2 / Période 2
	28.04 au 12.05	12.05 au 20.05	18.10 au 25.10	26.10 au 10.11
WEA1 – Ouest	DUO10925	DUO10592	DUO10925	DUO10925 (6.11)
WEA2 – Est	DUO10493	DUO10493	DUO10837	DUO10837
LUS Nord	DUO10592	X	X	DUO10493
LUS Sud	DUO10837	X	X	DUO10592

Tableau 1: Correspondance des sites et des périodes et type de sonomètres



Les deux sonomètres à l'émission (à distance IEC61400-11 de chaque éolienne) sont équipés d'un écran secondaire monté sur une plaque rigide.

Les deux sonomètres situés aux points d'immission sont posés au sol et ils sont équipés d'un écran secondaire constitué par une boîte ouverte recouverte de tissu acoustique.

Un mât météorologique est disposé à proximité du point IEC61400-11 Ouest. Les données récoltées, seulement pour la seconde période, complètent les données de SCADA.

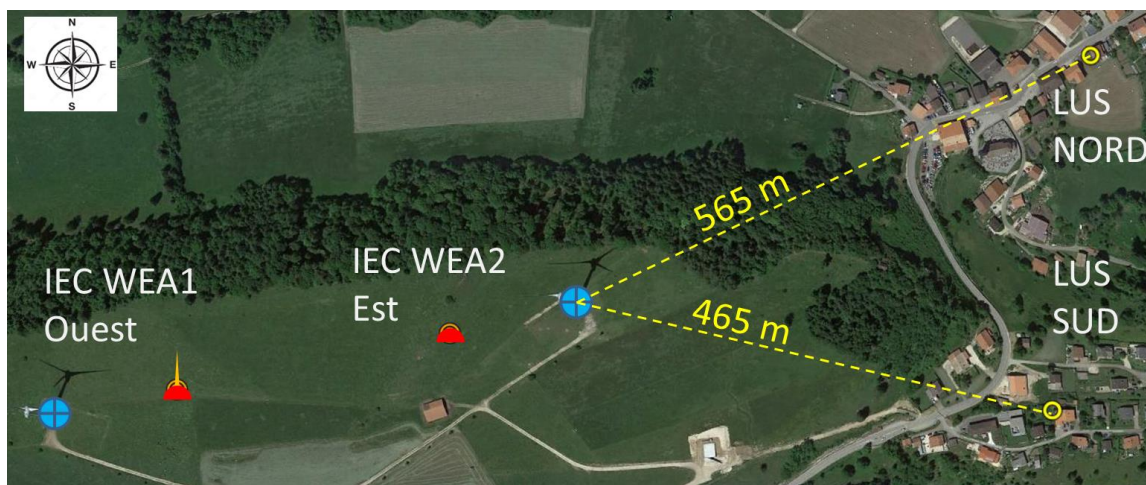


Figure 1: Positions des sonomètres



Figure 2: Photographies des points de mesure de type IEC61400-11



Figure 3: Photographies des points de mesure LUS Nord (à gauche) et LUS Sud (à droite). Le microphone extérieur est situé dans une cagette recouverte d'un tissu acoustique.

## 4 Données opérationnelles - SCADA

Les données de fonctionnement des deux éoliennes sont documentées pour chaque phase de mesure. Les informations sont composées de paramètres suivants :

- Puissance électrique
- Vitesse de rotation en tour par minute (rpm)
- Orientation de l'éolienne (considérée équivalente à la direction du vent)
- Vitesse du vent mesuré à la nacelle

Les données temporelles de chaque paramètre sont livrées par ENERCON:

- pour la phase n°1 avec une résolution d'une minute,
- pour la phase n°2 avec une résolution de dix minutes.

Les figures illustrant les données temporelles (vent, rpm, orientation, puissance) de chaque éolienne sont données en annexes.

### 4.1 Roses des vents SCADA – Phase n°1

Les données SCADA de cette première phase sont livrées par ENERCON avec une résolution d'une minute. Les figures ci-dessous représentent les roses de vents de chaque éolienne pour la période de mesure 28 avril 2017 au 23 mai 2017, période avant le montage des TES.

Il est remarquable que pour cette période l'éolienne WEA1(Ouest) est exposée à un vent plus fort que l'éolienne WEA2(Est) et que les directions prépondérantes du vent sont quelques peu différentes.

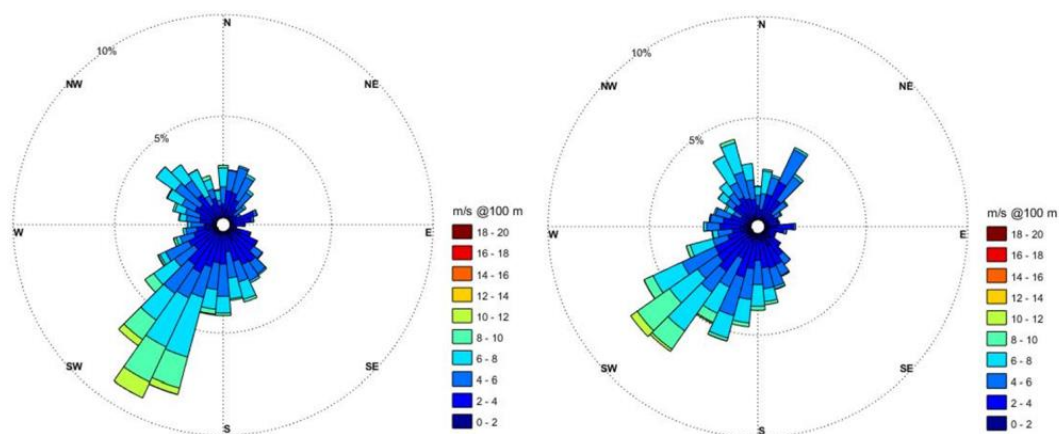


Figure 4: Roses des vents de la phase n°1, données SCADA – mesurages du vent à hauteur de la nacelle (h = 78 m). A gauche WEA1 (ouest), à droite WEA2 (est)

### 4.2 Roses des vents SCADA – Phase n°2

Les données SCADA de la seconde phase sont livrées par ENERCON avec une résolution de 10 minutes impliquant un traitement d'interpolation des données pour avoir une résolution d'une minute. Les figures ci-dessous représentent les roses de vents de chaque éolienne pour la période de mesure 17 octobre 2017 au 10 novembre 2017. Il est remarquable que sur cette période les deux roses de vent sont cette fois très similaires avec une prédominance pour les vents en provenance du Sud-Ouest.

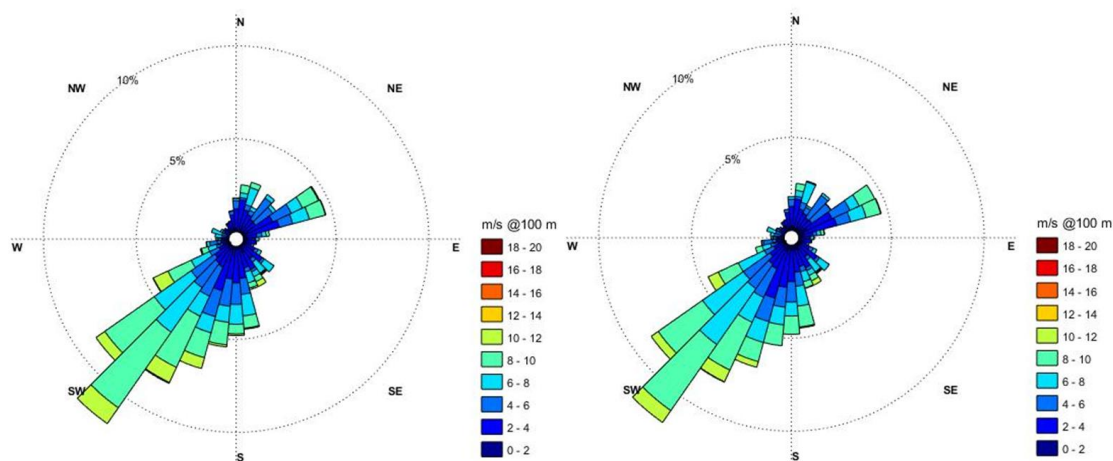


Figure 5: Roses des vents de la phase n°2, données SCADA – mesurages du vent à hauteur de la nacelle ( $h = 78$  m).. A gauche WEA1 (ouest), à droite WEA2 (est)

### 4.3 Statistiques SCADA – Phase n°1

La figure suivante illustre les statistiques de fonctionnement des deux éoliennes lors de la première phase de mesurage. Le bridage nocturne effectué sur l'éolienne Est (WEA2) est clairement distingué lorsque la vitesse de vent à la nacelle est supérieure à 8 m/s. On remarque deux modes de puissance de l'éolienne Est (WEA2) selon la vitesse de rotation (RPM).

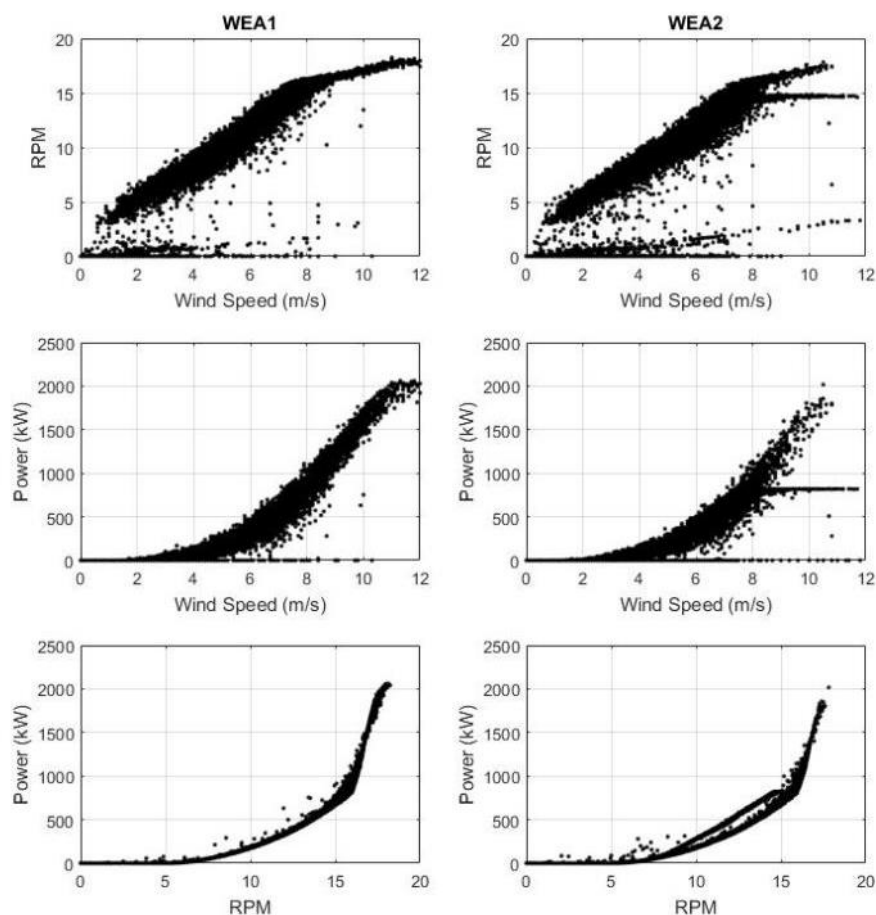


Figure 6: Statistiques SCADA - Phase n°1



## 4.4 Statistiques SCADA – Phase n°2

La figure suivante illustre les statistiques de fonctionnement des deux éoliennes lors de la seconde phase de mesure. Le bridage nocturne n'étant plus opéré, les statistiques des deux éoliennes sont très similaires.

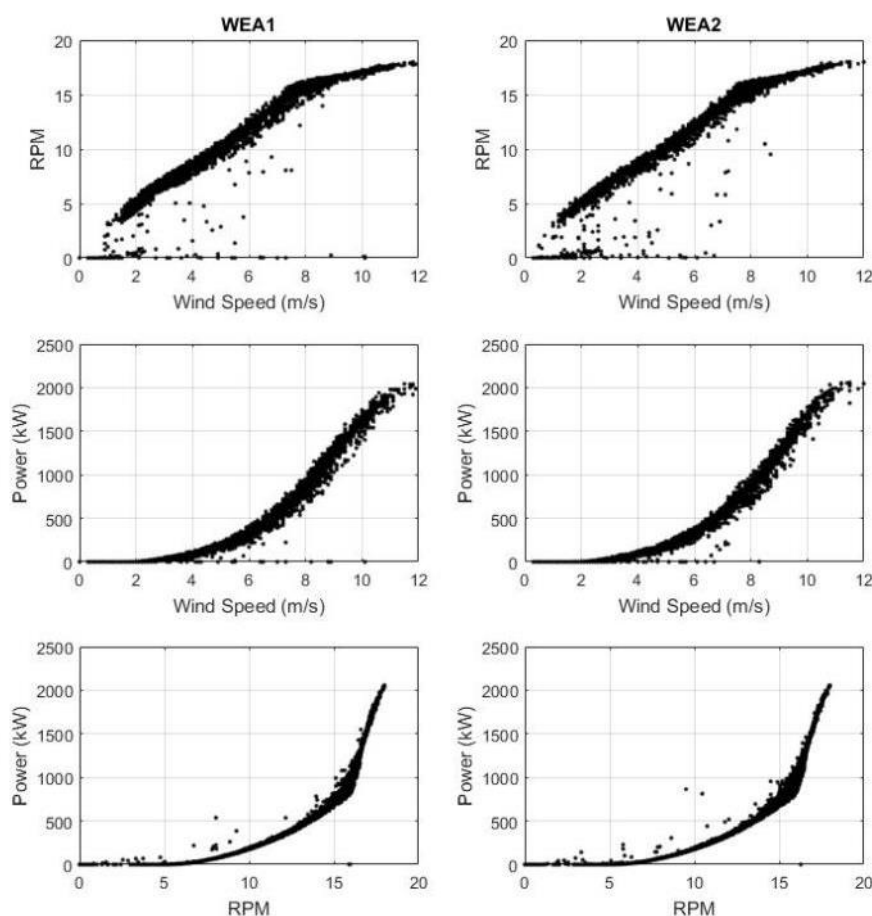


Figure 7: Statistiques SCADA - Phase n°2

## 5 Evaluations par phase d'arrêt

Les phases d'arrêt ont pour but de discriminer le bruit éolien du bruit ambiant en chaque point de mesure. Selon les conditions de bruit ambiant, le bruit de chaque éolienne est quantifiable par différenciation des niveaux sonores LAeq ou en bandes de tiers d'octave.

La Figure 8 est un rapport de mesure d'une séquence alternée d'arrêts et de mises en marche (on/off) des éoliennes WEA1(Ouest) puis WEA2(Est). Ce type de rapport indique les données de vent à la nacelle et de RPM pour chaque éolienne ainsi que les données sonométriques au point de mesure.

L'ensemble des rapports des phases on/off effectuées pour les deux phases de mesures indique que le bruit ambiant sur le site éolien est faible et permet des mesures acoustiques significatifs aux distances IEC61400-11 :2012. Sur l'ensemble des mesures on/off effectués l'émergence du bruit éolien sur le bruit ambiant se situe entre 6 dB environ (vent 3m/s, 6 rpm) et 25 dB environ (vent 10m/s, 18 rpm). L'émergence assurée du bruit éolien aux distances IEC61400-11 :2012 permet ainsi d'exprimer (particulièrement pour les vents forts) les statistiques des niveaux sonores du bruit éolien sans compensation de l'effet additif du niveau du bruit ambiant (vent) avec le bruit éolien. Aux lieux d'immission il faut par contre en tenir compte.

Figure 1 displays five subplots related to the WEAs (Wind Energy Assessment) data for the period 07-May-2017 15:30:00 to 07-May-2017 16:45:00.

- Top Left Plot:** Wind speed [m/s] (left y-axis, 0 to 15) and Orientation [deg] (right y-axis, 0 to 360) vs Time. The plot shows wind speed fluctuations and orientation changes. The legend indicates: WEA1 wind (solid black line), WEA2 wind (solid blue line), WEA1 ori (dashed black line), and WEA2 ori (dashed blue line).
- Top Middle Plot:** RPM [1] (y-axis, 0 to 18) vs Time. The plot shows the RPM of the WEAs. The legend indicates: WEA1 rpm (solid black line), WEA2 rpm (solid blue line), and Audio rpm (red dots).
- Bottom Left Plot:** LAeq - dB(A) (y-axis, 15 to 85) vs Time. The plot shows the LAeq (Leq) in dB(A) over time. The legend indicates: WEA1 (solid black line), WEA2 (solid blue line), and Audio (red line).
- Bottom Right Plot:** LAeq - dB(A) (y-axis, 15 to 85) vs Spectre Moyen - dB(Z) (x-axis, 0 to 100). The plot shows the LAeq (Leq) in dB(A) as a function of the Spectre Moyen (Mean Spectrum) in dB(Z). The legend indicates: WEA1 (solid black line), WEA2 (solid blue line), and Audio (red line).

Figure 8: Rapport de mesure du bruit éolien au point IEC-WEA1 pour une séquence d'arrêts (arrêts figurés par les courbes RPM à 0).

## 6 Analyses statistiques à l'émission

Les analyses des niveaux sonores relativement au fonctionnement des éoliennes (RPM) sont effectuées pour des périodes validées des deux phases de mesurages. En effet certains problèmes techniques rencontrés lors des mesurages invalident plusieurs jours pour chaque phase. Ainsi les statistiques de la phase 1 sont effectuées pour 14 jours de mesurages continus entre le 29 avril et le 12 mai 2017. Pour la phase 2, 10 jours de mesurage sont considérés entre le 27 octobre et le 6 novembre 2017. Pour les deux phases, les vitesses de rotation des éoliennes sont réparties entre 4 RPM et 18 RPM couvrant toute la dynamique de production d'énergie.

### 6.1 Statistiques WEA n°1 ouest) et WEA n°2 (est)

Les Figure 9 et Figure 10 illustrent les statistiques de niveaux sonores LAeq minimum (nommés Lmin dans les graphiques) pour une durée d'observation d'une minute en fonction de la vitesse de rotation (RPM) de l'éolienne WEA1 (ouest) et WEA2 (est) pour les deux phases de mesurages aux distances IEC61400-11. La dispersion des données étant faible, la valeur moyenne par classe de RPM permet de caractériser le niveau sonore par classe de RPM avec une bonne précision.

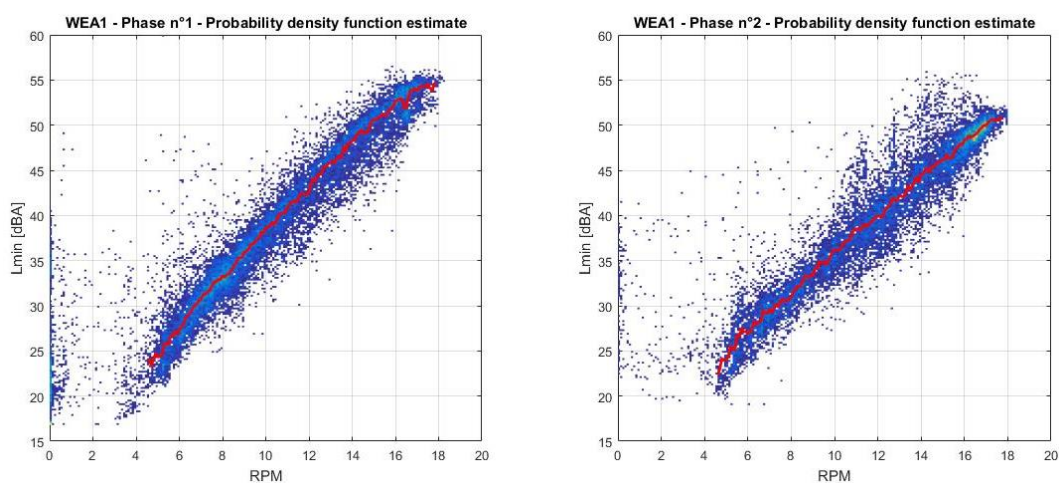


Figure 9: Statistiques brutes de l'éolienne WEA1 (Ouest) - mesurages acoustiques classés selon les données RPM SCADA.

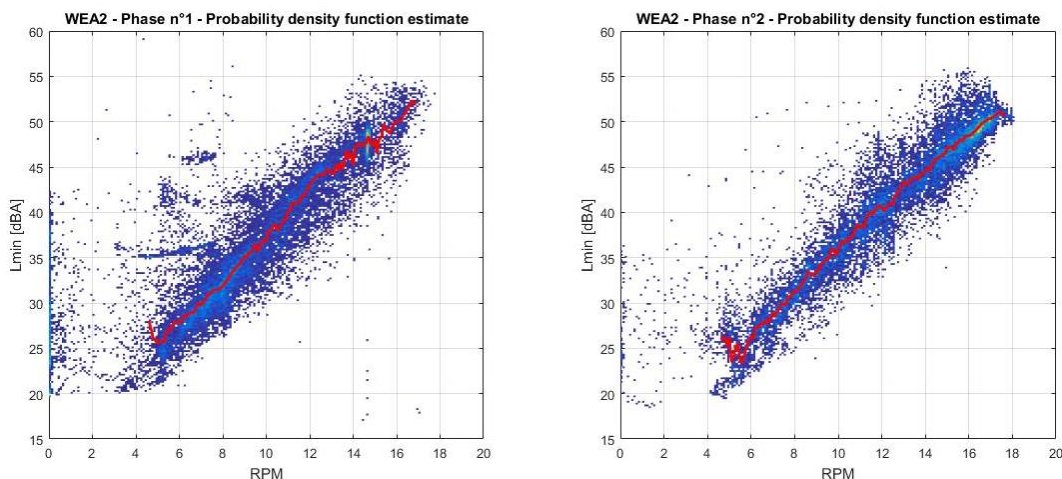


Figure 10: Statistiques brutes de l'éolienne WEA2 (Est) - mesurages acoustiques classés selon les données RPM SCADA

### Remarque

Usuellement les niveaux sonores sont exprimés relativement à la mesure de vent à hauteur de 10 m. Ne disposant pour les deux phases seulement que des mesures de vent à la nacelle (à 78 m de hauteur) et, après avoir exprimé les niveaux sonores relativement à la vitesse de vent puis à la vitesse de rotation du rotor (RPM), nous proposons ici une représentation selon la vitesse de rotation du rotor. En effet le bruit éolien étant majoritairement aérodynamique, son niveau est corrélé à la vitesse tangentielle en bout de pale (lieu de disposition des TES) et à l'orientation des pales (pitch), cette dernière donnée n'étant pas indiquée dans les données SCADA. Les deux modes de représentation des statistiques sont données en annexe.

La comparaison des valeurs moyennes du bruit des deux éoliennes par phase est donnée dans la Figure 11: elle valide le principe de mesurage à proximité des éoliennes aux distances IEC61400-11 :2012.

Pour la phase n°1, malgré une bonne similarité les courbes WEA1 et WEA2 sont disjointes et peuvent s'expliquer par le fait que la rose des vents est différente pour chaque éolienne (vitesse et orientation) et que lors des périodes de haute vitesse de vent, le bridage nocturne appliqué à l'éolienne WEA2 influence les statistiques.

Par contre pour la phase n°2, laquelle propose des roses de vent identiques et sans bridage nocturne de l'éolienne WEA2, les courbes sont considérées identiques.

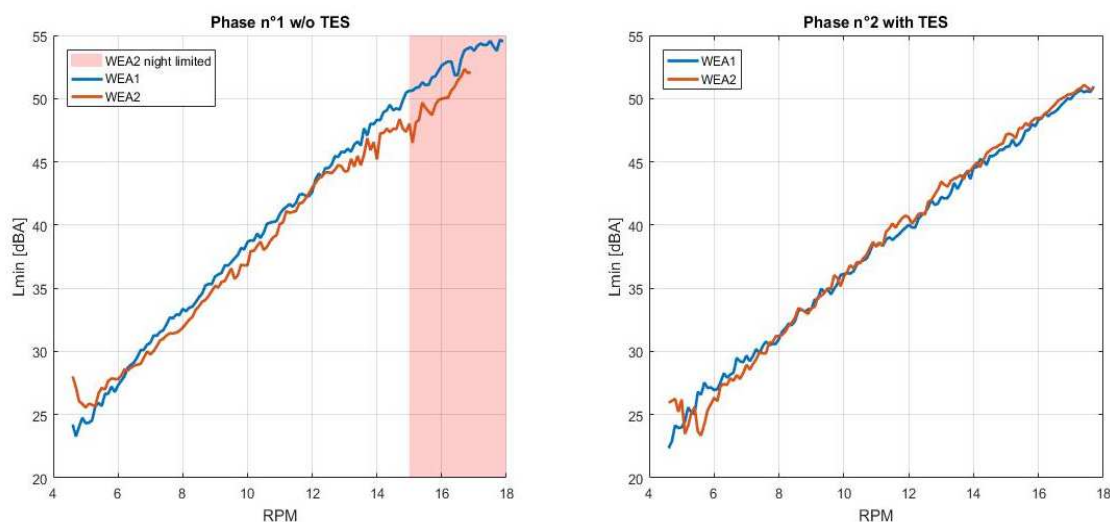


Figure 11: Comparaison des niveaux sonores des éoliennes WEA1 (Ouest) et WEA2 (Est) avant et après installation des TES.

## 6.2 Statistiques sur l'efficacité des TES

L'évaluation de l'efficacité des TES s'effectue par comparaison des niveaux sonores moyens collectés aux distances IEC61400-11 :2012 des deux phases de mesurage. Les figures suivantes illustrent les comparaisons et les quantifications de l'efficacité des TES par régime de rotation du rotor (RPM).

Pour l'éolienne WEA1 (ouest), l'efficacité mesurée propose une réduction progressive du niveau sonore entre 0 dB et 4 dB selon le RPM. Sous l'hypothèse que les turbulences en sortie de pales se développent à haute vitesse, l'efficacité des TES à réduire le bruit d'écoulement aérodynamique est plus grande à plein régime qu'à bas régime.



Pour l'éolienne WEA2(Est), l'efficacité mesurée propose en moyenne une réduction de 2 dB du niveau sonore mais ne présente pas d'accroissement de l'efficacité selon le RPM. Pour l'interprétation de ces résultats, il est à considérer que l'éolienne WEA2(Est) était soumise à un bridage nocturne lors de la phase 1 et que la rose des vents de cette première phase présente des différences plus marquées avec la phase 2 que pour l'éolienne WEA1(ouest).

Pour ces deux estimations, les considérations d'orientation des vents et autres probables effets de directivité des éoliennes ne sont pas retenues, il s'agit donc d'une estimation propre aux conditions de mesurage (rose des vents et sites de mesurages). Une analyse plus approfondie tenant compte de l'orientation de l'éolienne pourrait compléter ces résultats.

En conclusion, selon les conditions d'interprétation exprimées précédemment, les deux courbes d'évaluation d'efficacité des TES indiquent une réduction du niveau sonore d'au moins 2 dB environ pour les vitesses de rotation supérieures à 8 RPM. Les résultats obtenus à proximité de l'éolienne WEA1 (ouest) sont les plus fiables en termes de conditions de mesurages (similarité des roses des vents de deux phases et pas de bridage nocturne).

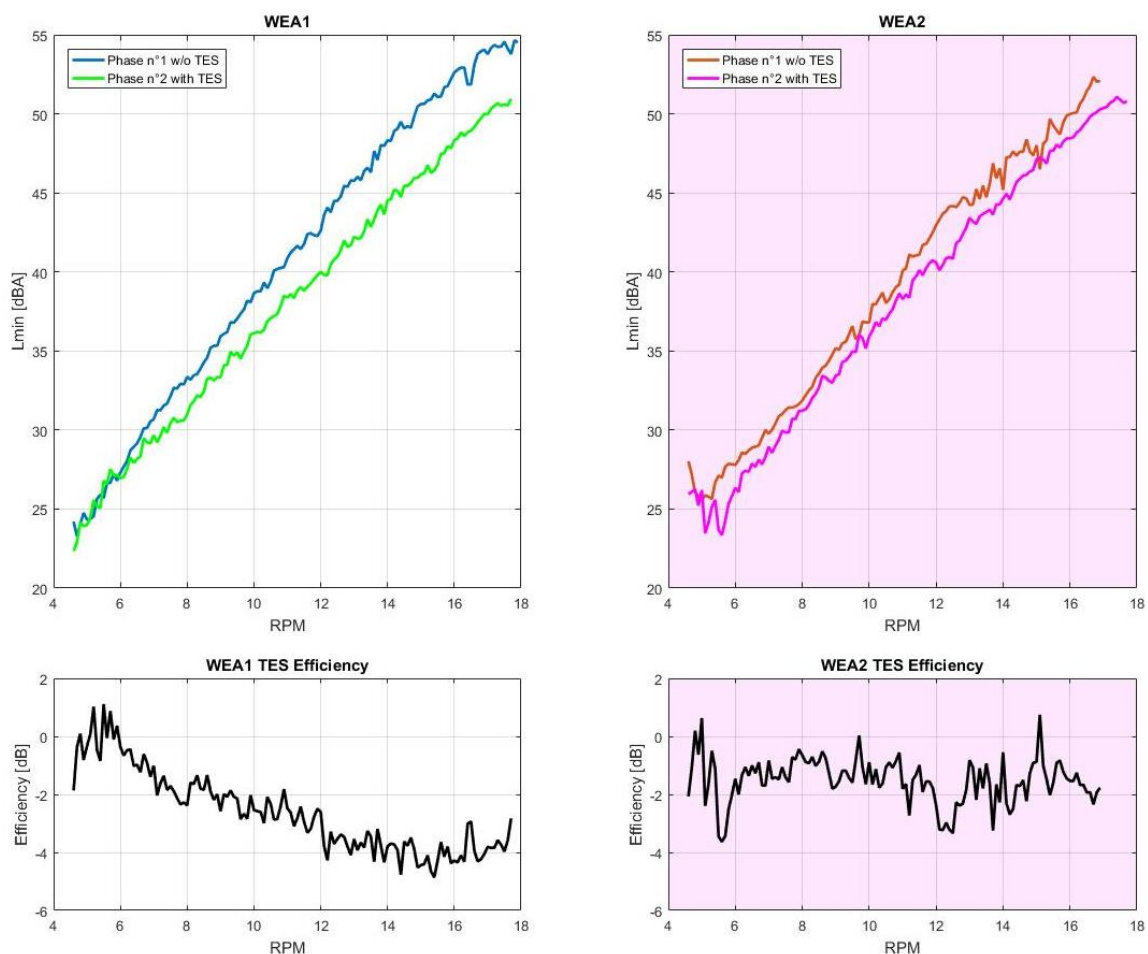


Figure 12: Statistiques moyennes des éoliennes WEA1 (Ouest) et WEA2 (Est) – En haut : comparaison des niveaux sonores avant et après installation des TES : en bas : estimation statistique des efficacités. WEA1 est l'éolienne de référence pour l'estimation (pas de bridage nocturne lors de la première phase au contraire de WEA2).

## 6.3 Spectres et efficacité des TES

L'efficacité des TES est la plus grande pour les vitesses de vent (resp. de rotation du rotor) les plus grandes. Afin d'évaluer l'influence des TES sur les spectres du bruit éolien, la comparaison s'effectue sur une période représentative pendant laquelle la puissance de l'éolienne est d'environ de 2000 kW soit à 17.5 RPM et pour l'orientation située entre 220 et 230 degrés. En effet la base de données pour effectuer des comparaisons statistiques sur l'efficacité des TES à l'immission par classe de vent (vitesse, orientation) est limitée suite au bridage nocturne de l'éolienne WEA2 lors de la phase n°1.

Pour chaque phase de mesurage, une période de 30 secondes est trouvée pendant laquelle le bruit éolien est audible aux lieux d'immission. Les spectres sont issus des relevés sonométriques effectués pour la phase n°1 le 6 mai 2017 de 19h30m55s à 19h31m25s et pour la phase n°2 le 29 octobre 2017 de 04h20m00s à 04h20m30s.

Les Figure 13 et Figure 14 présentent les spectres en bande de tiers d'octave dans l'intervalle 63 Hz – 4 kHz du bruit éolien mesurés aux distances IEC61400-11 (émission) et aux lieux d'immission. Pour ces deux périodes, les mesures sont entachées de bruit parasite ayant des influences significatives sur les domaines spectraux signifiés en rose.

Aux lieux d'émission, l'efficacité des TES s'exprime majoritairement dans les bandes de fréquences entre 125 Hz et 1 kHz (bandes d'audibilité aux lieux d'immission) et dans les bandes de fréquences supérieures à 1.6 kHz.

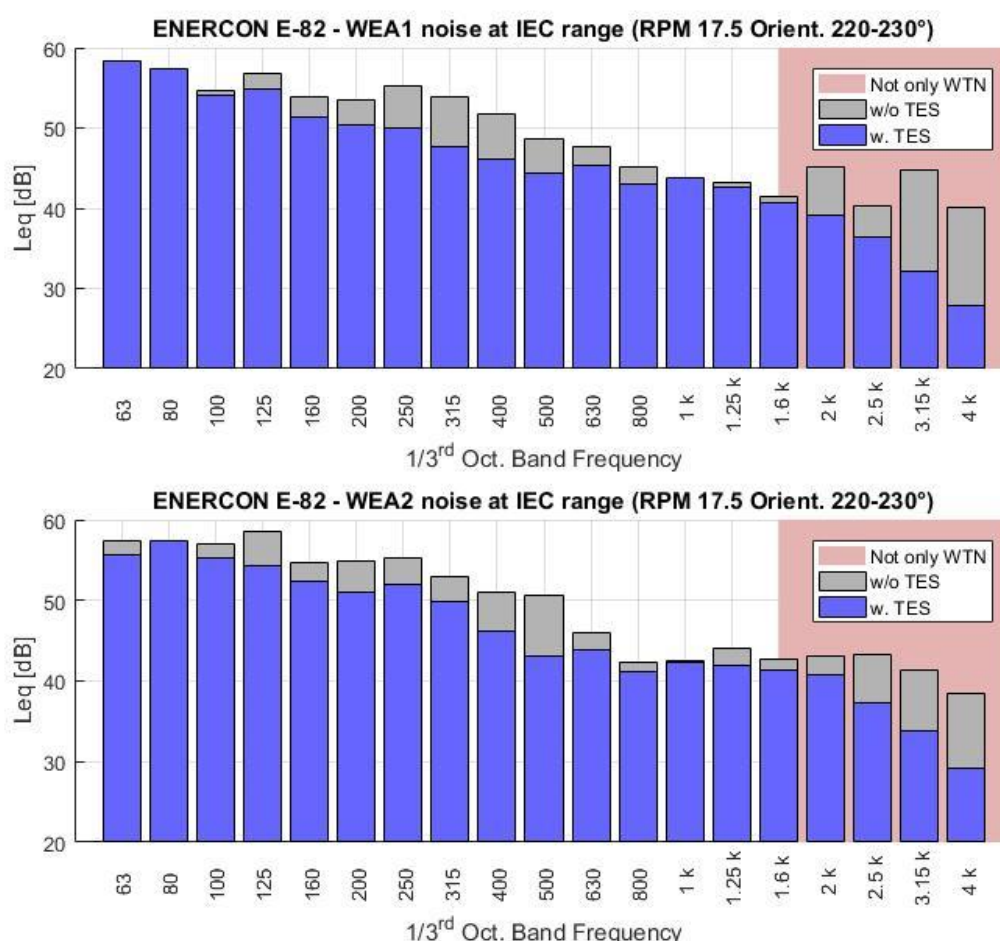


Figure 13: Spectres aux distances IEC61400-11 avant et après installation des TES

Aux lieux d'immission, l'efficacité des TES est observable pour ces mêmes bandes de fréquences indiquant une réduction des niveaux sonores. La généralisation de ces résultats ne peut cependant pas être effectuée sans un approfondissement conséquent de l'analyse de la base de données constituée.

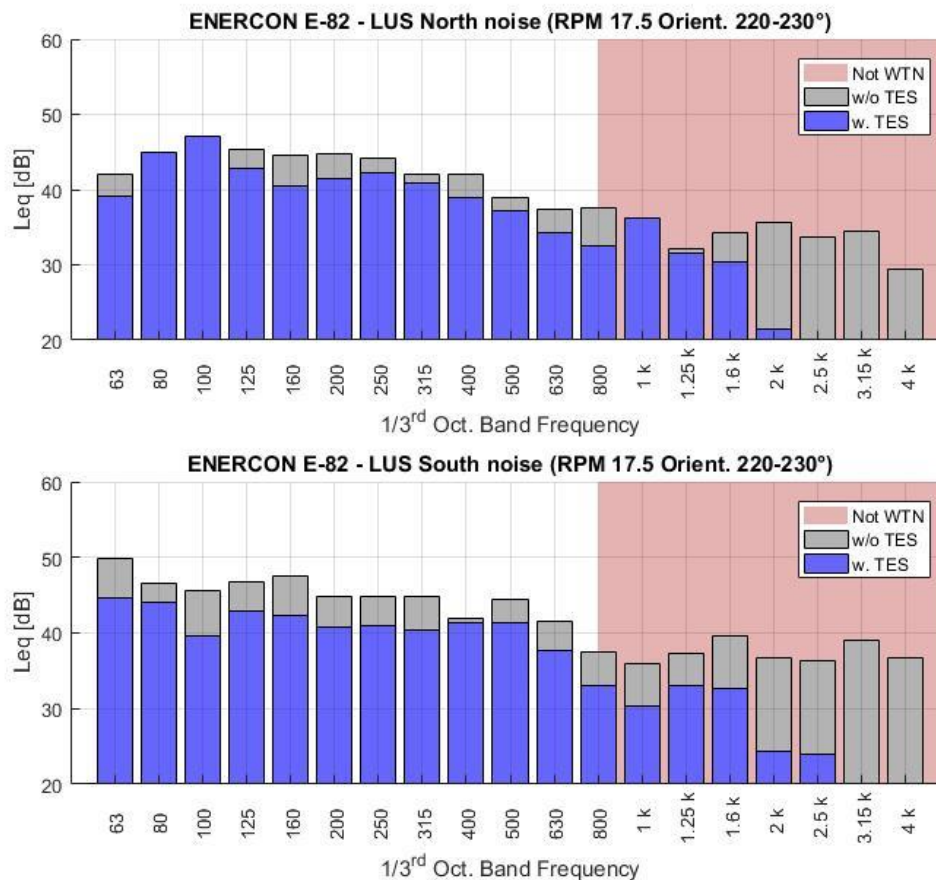


Figure 14: Spectres aux LUS avant et après installation des TES

Le tableau suivant indique les niveaux sonores LAeq (1 min) et L90 (l'indice fractile L90 est le niveau de bruit LAeq atteint ou dépassé pendant 90% du temps, par rapport à la durée totale de la mesure) correspondants aux sites d'émission et d'immission. Pour les deux éoliennes mesurées aux distances IEC61400-11, les niveaux L90 indiquent une réduction du niveau sonore de 3 dB environ. Aux lieux d'immission, les valeurs obtenues ne sont pas retenues au regard des conditions de bruit ambiant. Une approche statistique sur l'ensemble des mesurages est donc à privilégier pour conclure sur l'efficacité des TES aux lieux d'immission.

Sites / Niveaux sonores	Phase n°1 RPM 17.5 Orientation 220-230°		Phase n°2 RPM 17.5 Orientation 220-230°		Différence	
	LAeq dBA	L90 dBA	LAeq dBA	L90 dBA	LAeq dBA	L90 dBA
IEC WEA2	57.6	55.3	53.7	52.1	3.9	<b>3.2</b>
IEC WEA1	57.1	55.1	53.6	52.1	3.5	<b>3</b>

Tableau 2: Niveaux sonores LAeq (1 min) et L90 pour les deux périodes et pour chaque site de mesurage.

## 7 Statistiques à l'émission et l'immission

Les niveaux sonores aux lieux d'émission (WEA1, WEA2) et d'immission (LUS Nord, LUS Sud) au cours des deux phases sont présentés dans la Figure 15 sous leurs formes statistiques selon la vitesse de vent à hauteur de nacelle de l'éolienne WEA2 (Ouest).

Les moyennes statistiques aux distances IEC61400-11 sont figurées par les courbes rouges pour les éoliennes WEA1 et WEA2. Ces courbes moyennes mesurées à l'émission sont ensuite reportées aux lieux d'immission: le calcul du bruit éolien aux lieux d'immission est basé sur l'extrapolation du bruit mesuré aux distances IEC61400-11 diminué des termes de divergence géométrique et des pertes par absorption selon la distance ; les effets de sol et autres effets de propagation dus au terrain (relief) et aux obstacles (bâtiments) ne sont pas pris en compte par cette modélisation.

Pour chaque graphique la courbe pleine (noire et pointée) présente les valeurs indicatives du bruit éolien selon une fiche d'ENERCON relative au modèle E-82. N'ayant pas de précision sur les modèles de St-Brais, nous effectuons les hypothèses que les valeurs de cette fiche (représentées dans l'annexe 12) sont en bonne correspondance avec la réalité. Les données de cette fiche sont relatives à des vents ne couvrant pas toute gamme de vent exploitée par l'éolienne. Il est aussi important de mentionner que les niveaux sonores de cette fiche sont exprimés pour un vent mesuré à hauteur de 10 m et pour une rugosité fixe. Les valeurs de vent extrapolées à la hauteur de la nacelle ont été calculées pour une rugosité de 0.05 ; valeur communément admise dans les modélisations. Ainsi les courbes des niveaux sonores (traits pleins et pointés) sont à interpréter avec précaution.

Cependant au regard des distributions statistiques des niveaux sonores aux lieux d'immission, il est remarquable que les niveaux sonores minimaux observés correspondent bien aux prévisions des niveaux sonores calculés tant statistiquement que par modélisation pour les vents supérieurs à 6m/s à hauteur de nacelle.

L'éolienne WEA1 (ouest) ne participe que partiellement au bruit éolien total (apport inférieur à 1 dB) qui est dominé par celle de l'éolienne WEA2 (est) la plus proche des lieux d'immission. Les niveaux sonores du bruit éolien correspondant aux valeurs minimales du bruit aux lieux d'immission, le bruit éolien y est très probablement toujours audible pour des vents supérieurs à 6 m/s.

Bien que le bruit éolien aux lieux d'immission soit majoritairement dominé par l'éolienne WEA2(est) pour laquelle les comparaisons entre les deux phases sont délicates en considérant les roses des vents et bridage nocturne lors des deux phases de mesurages, il peut être conclu sur la base d'une lecture méticuleuse de ces statistiques que l'efficacité des TES mesurée à proximité des éoliennes est transposable aux lieux d'immission. En effet la lecture croisée des statistiques des éoliennes WEA1 et WEA2 avec les calculs de modélisation permettent d'observer la réduction du bruit éolien aux lieux d'immission.

Ces mêmes statistiques sont données en annexe selon :

- LAeq vs Vitesse de vent @78 m
- L90 vs Vitesse de vent @78 m
- LAeqmin vs Vitesse de vent @78 m
- LAeq vs RPM
- L90 vs RPM
- LAeqmin vs RPM

Comme figuré dans les rapports sonométriques et les spectres à l'immission, le bruit éolien est faiblement émergent sinon non présent dans les bandes de tiers d'octave supérieures à 800 Hz selon les conditions de bruit ambiant. Il serait ainsi intéressant d'exprimer ces mêmes statistiques pour un niveau sonore calculé dans les bandes de fréquences de 20 Hz à 800 Hz.



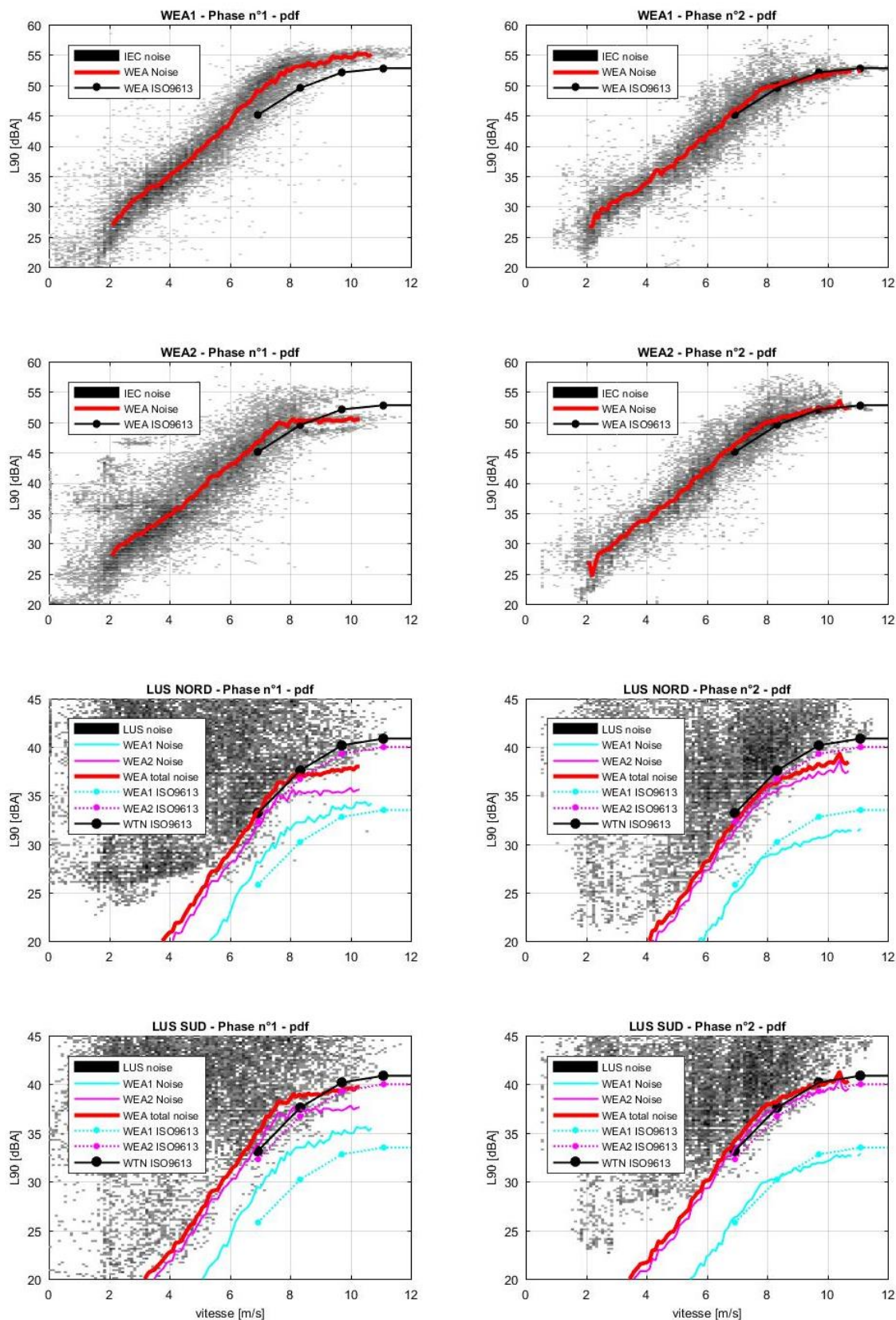


Figure 15: Statistiques des niveaux sonores L90 (1 minute). À gauche, phase n°1; à droite phase n°2. En couleur les estimations du bruit éolien total et des bruits éoliens WEA1 et WEA2. En noir la courbe d'approximation du bruit éolien selon ISO9613-2. La vitesse du vent est mesurée à hauteur de nacelle (h=78 m).

## 8 Remarques sur l'évaluation de d'audibilité

L'émergence forte du bruit éolien sur le bruit ambiant étant permanente aux distances IEC61400-11, le bruit éolien (motif audible répétitif corrélé à la rotation du rotor) est clairement distingué dans les enregistrements sonores. L'estimation de la vitesse de rotation RPM de chaque éolienne est donc réalisable si basée sur un traitement adapté des données en bandes de tiers d'octave avec une résolution temporelle suffisante (ici 125 ms). En opérant des transformées de Fourier sur des bandes spécifiques du sonogramme en bandes de tiers d'octave, il est possible d'exprimer un RPM instantané avec une résolution d'environ 3 secondes.

La figure suivante indique pour une période de plusieurs jours les valeurs extrêmes SCADA (en bleu : valeurs maximales, en cyan valeurs minimales) et les valeurs RPM calculées depuis l'analyse audio (en rose). Pour les vitesses de rotation du rotor inférieures à 3 rpm, l'algorithme ne donne pas de résultat (manque d'émergence du bruit éolien). Pour les vitesses de rotation du rotor supérieures à 3 rpm, les estimations de la vitesse de rotation instantanée sont donc en bonne adéquation car bornées par les extrema des données SCADA. La caractérisation de l'audibilité du bruit éolien en un site, basé sur l'hypothèse de l'émergence du bruit éolien sur le bruit ambiant, est donc réalisable avec ce type de traitement.



Figure 16: Evaluation de la vitesse de rotation instantanée par analyse audio. En bleu et cyan les valeurs max et min des données SCADA; en rose les valeurs RPM instantanées issues du traitement audio.

Ces mêmes évaluations de la vitesse de rotation du rotor ont été effectuées sur les sites d'immission. La figure suivante présente les estimations de la vitesse RPM depuis les données sonométriques du lieu d'immission LUS Nord de la phase n°2. Les valeurs calculées du RPM instantané (signifié en rouge) sont présentes seulement lorsque le bruit éolien est détecté. Ces données « d'audibilité » sont essentiellement retrouvées lors des périodes nocturnes et des jours de repos (samedi et dimanche) pendant lesquelles le bruit ambiant est faible. La même analyse effectuée au LUS Sud propose des résultats similaires (cf. annexe).

Cette première méthode, proche dans son principe de celle proposée par l'Institute of Acoustics (UK) pour l'évaluation des modulations d'amplitude, pourrait être étudiée plus précisément dans le cadre de mesurage de réception et de qualification de l'audibilité des phases de bruit des éoliennes. La caractérisation pleine de cette méthode (robustesse et précision) n'étant pas dans le cadre de ce mandat, nous n'avons pas exprimé de quantification de l'audibilité des composantes impulsives telles qu'évaluées dans les mesurages de réception selon l'Ordonnance pour la Protection contre le Bruit Annexe 6. Les durées et périodes des phases audibles du bruit éolien sont donc quantifiables sur la base de cette première méthode d'analyse des données sonométriques.

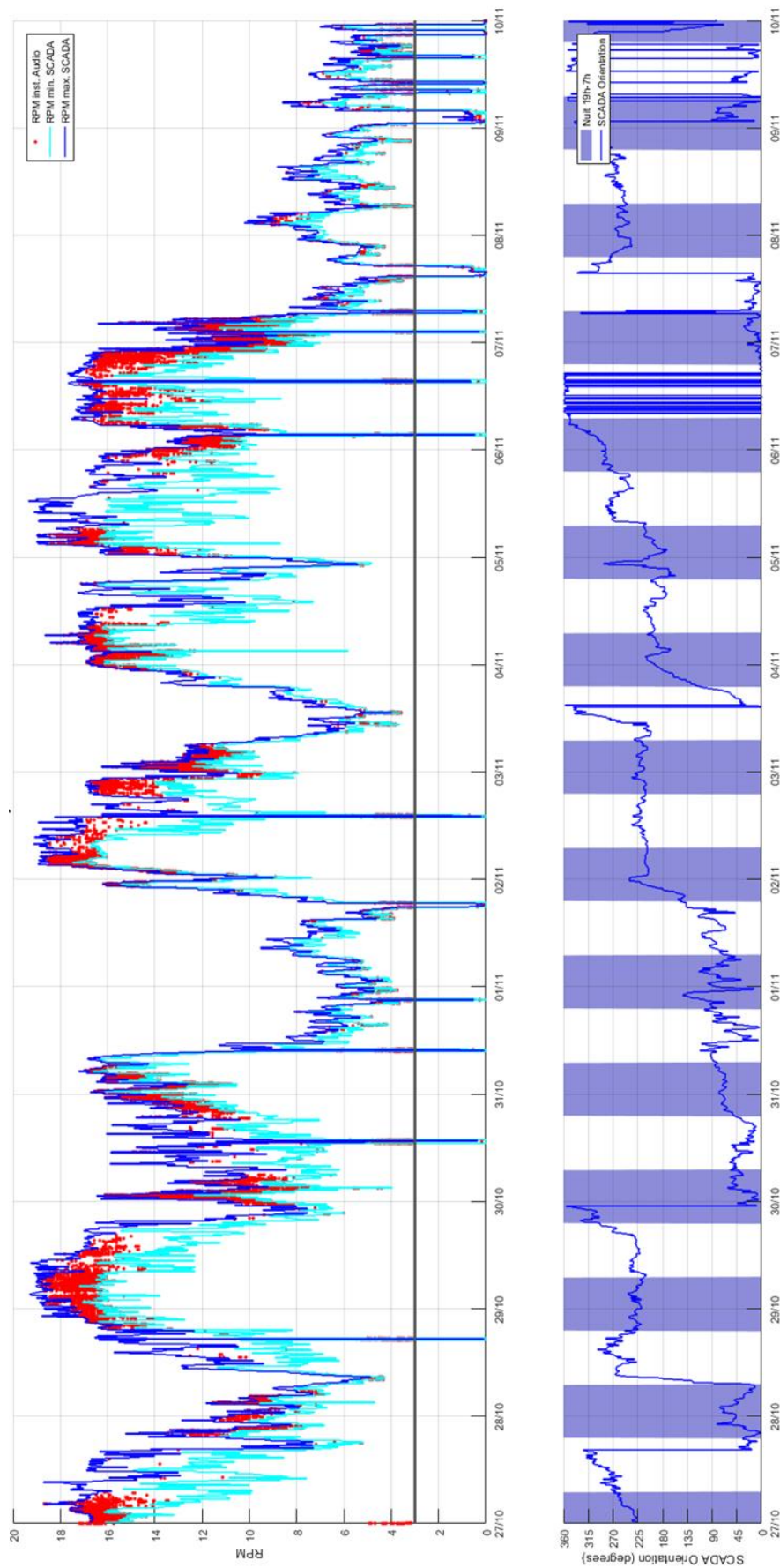


Figure 17: Evaluation de la vitesse de rotation RPM par analyse audio sur les données sonométriques du LUS Nord - Phase n°2



## 9 Bridage nocturne

A titre informatif, l'évaluation de l'effet du bridage nocturne sur les niveaux de bruit des quatre sites de mesurages a été effectuée sur les données du 6 mai 2017 entre 21h et 23h. Le rapport sonométrique correspondant est donné en annexe et les niveaux sonores mesurés avant et pendant le bridage nocturne sont indiqués dans le tableau suivant.

Sites / Niveaux sonores	Sans bridage WEA2 21h-22h L90	Avec bridage WEA2 22h-23h L90	Différence
<b>IEC WEA2</b>	53.4 dBA	50.6 dBA	<b>2.8 dB</b>
<b>IEC WEA1</b>	54.2 dBA	54.2 dBA	<b>0 dB</b>

Tableau 3: Evaluation de l'efficacité du bridage nocturne - 6 mai 2017

Sur cette période 21h-23h, l'éolienne WEA1 est à régime constant (environ 17 RPM) et les niveaux sonores L90 sont stationnaires autour de 54 dBA, témoignant ainsi d'un vent stationnaire en vitesse et en orientation. La différence de 0 dB au point IEC WEA1 indique ainsi que les conditions de vent et de bruit ambiant sont satisfaites pour effectuer les comparaisons au point IEC de l'éolienne WEA2. Le bridage de l'éolienne WEA2 (de 17 RPM à 15 RPM environ) permet de réduire le bruit de 3 dB environ à la distance IEC61400-11 :2012.

## 10 Conclusion

Le but principal de l'étude était de quantifier l'efficacité des TES, efficacité mesurée aux distances IEC61400-11 :2012 à proximité des éoliennes. Le protocole de mesure et l'ensemble des données collectées ont permis d'extraire des statistiques fiables pour tous les régimes de fonctionnement des éoliennes. La comparaison des niveaux sonores par classe de vitesse de rotation (rpm) ou de vitesse de vent avant et après installation des dentelures de bord de fuite (TES) montre que la réduction du niveau sonore du bruit éolien se situe entre 2 dB et 4 dB à l'émission et d'environ 2 à 3 dB à l'immission pour les régimes de rotation supérieurs à 12 rpm ou de vent supérieurs 6m/s à hauteur de nacelle. La quantification de l'efficacité des TES aux lieux d'immission a donc été estimée par extrapolation; en effet les conditions de bruit ambiant et le bridage nocturne opéré avant l'apport des systèmes TES ne permettent pas de disposer d'une base de données complètes pour effectuer avec précision une bonne quantification de la réduction du bruit éolien selon les conditions de vent (vitesse et orientation). Selon nos analyses statistiques et autres écoutes des enregistrements audio, le bruit de « swish » a été diminué par l'apport des TES qui sont efficaces dans les bandes audibles entre 125 Hz et 1 kHz, bandes de fréquences caractéristiques du bruit éolien à moyennes et longues distances (lieux d'immission).

Yverdon-les-Bains, le 27 avril 2018

**Prona SA**



p.p Xavier Falourd  
Dr ès Sc. Tech EPFL Acoustique



e.r Lukas Rohr  
Dr ès Sc. Tech EPFL Acoustique

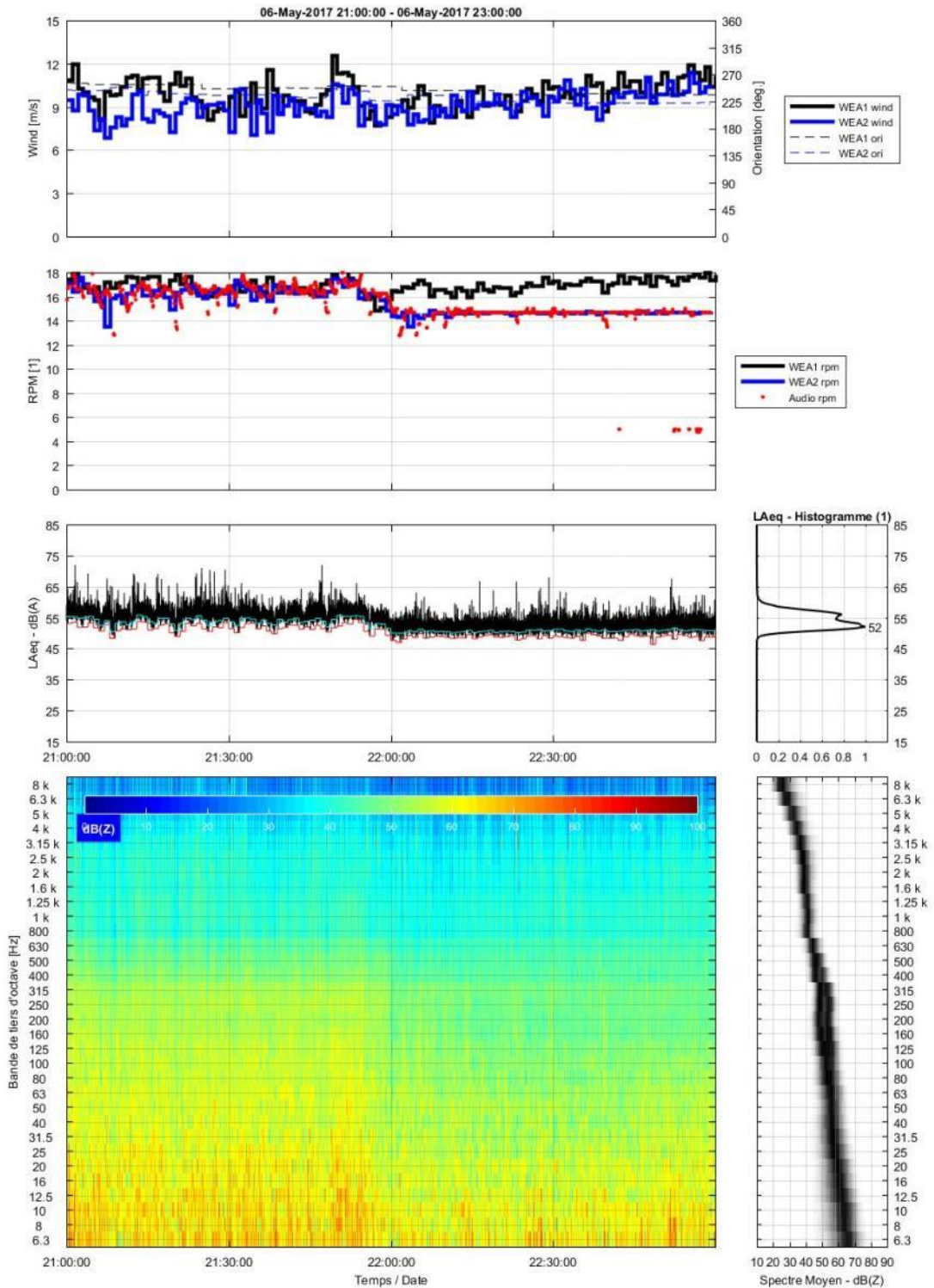
## Annexes

- A1 – Rapport WEA2 – Phase n°1 – bridage nocturne
- A2 – Rapport sonométrique à l'émission WEA2 – Phase n°2
- A3 – Rapport sonométrique à l'émission WEA1– Phase n°2
- A4 – Rapport à l'immission LUS Sud – Phase n°2
- A5 – Rapport à l'immission LUS Nord– Phase n°2
- A6 – Statistiques SCADA Phase n°1
- A7 – Statistiques SCADA Phase n°2
- A8 – Comparaison LAeqmin vs RPM ou Vitesse vent
- A9 – Efficacité des TES - LAeqmin vs Vitesse vent
- A10 – Spectre ENERCON E-82
- A11 – Statistiques LAeq vs Vitesse vent
- A12 – Statistiques L90 vs Vitesse vent
- A13 – Statistiques LAeqmin vs Vitesse vent
- A14 – Statistiques LAeq vs Power
- A15 – Statistiques L90 vs Power
- A16 – Statistiques LAeqmin vs Power

# A1 – Rapport WEA2 – Phase n°1 – bridage nocturne

WEA2

PHASE n°1

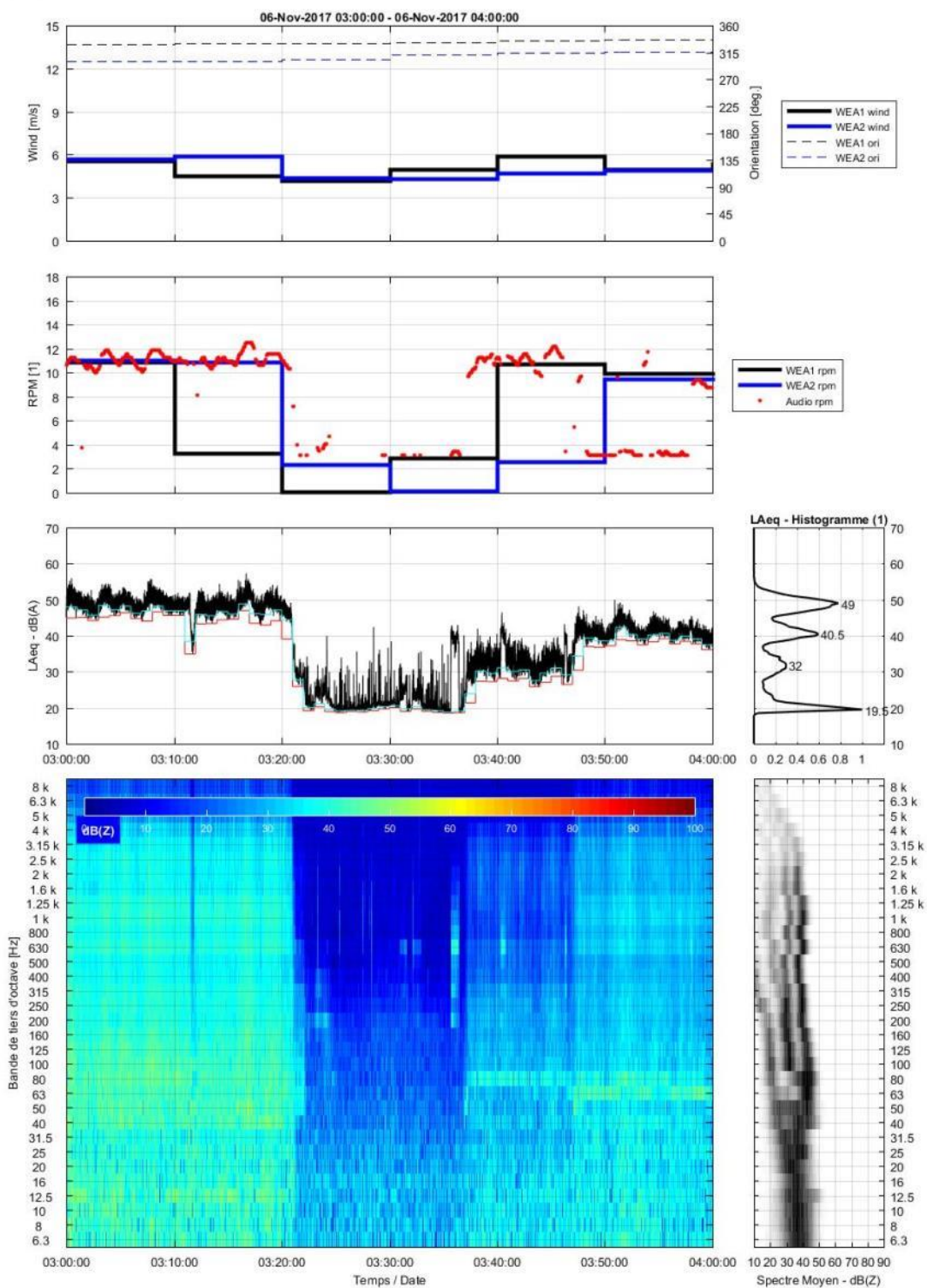


Serial Number - 10493  
 Time Resolution - 0.125 s  
 P17165  
 F:\Projets\2017\P17165\_Database\P17165-Mesures-Phase1\WEA2\20170506\_000000\_000000

## A2 – Rapport sonométrique à l'émission WEA2 – Phase n°2

WEA2

PHASE n°2



Serial Number - 10837

Time Resolution - 0.125 s

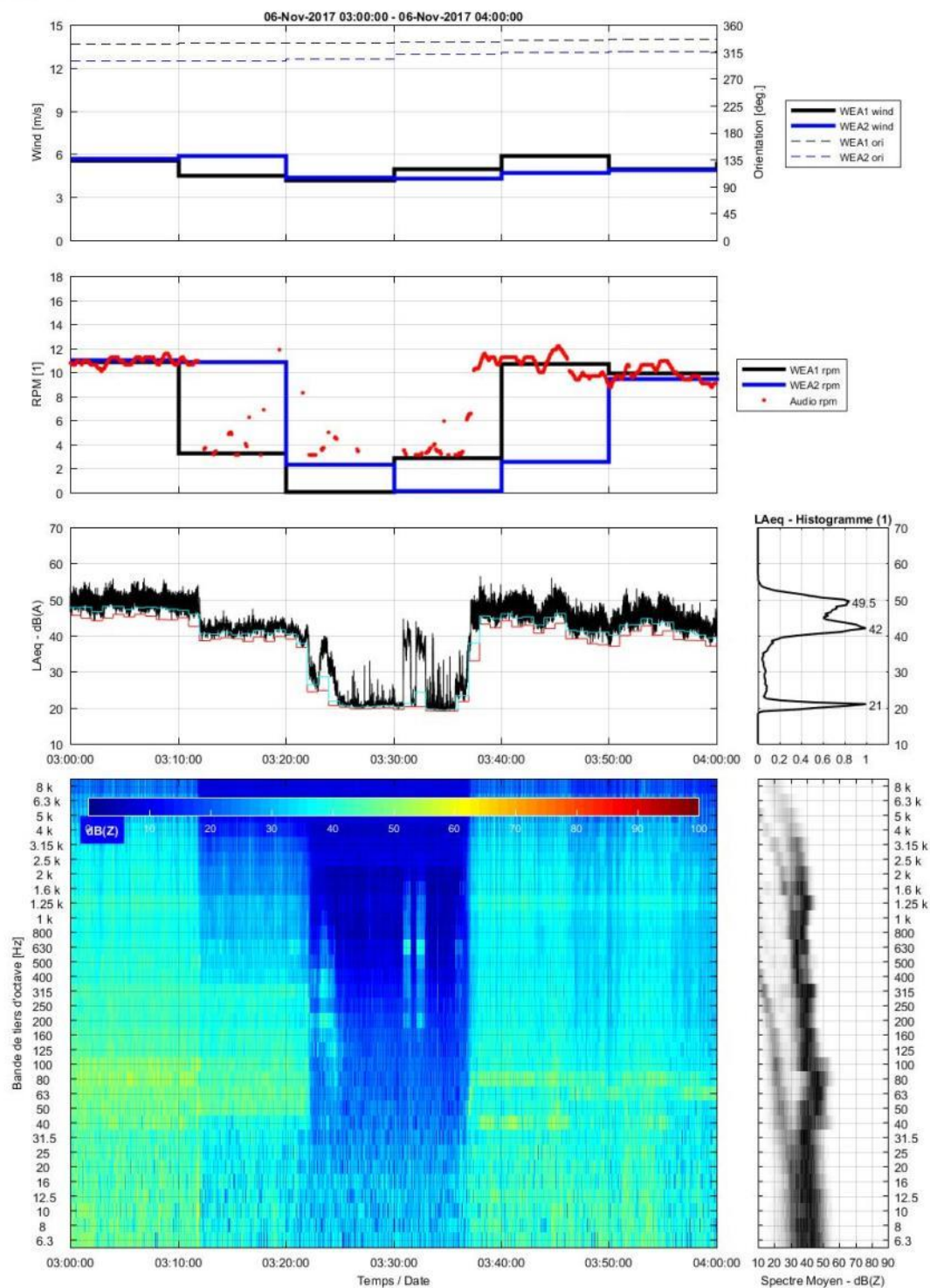
P17165

F:\Projets\2017\P17165\_Database\P17165-Mesures-Phase2\WEA2\20171106\_000000\_000000



## A3 – Rapport sonométrique à l'émission WEA1 – Phase n°2

### WEA1 PHASE n°2

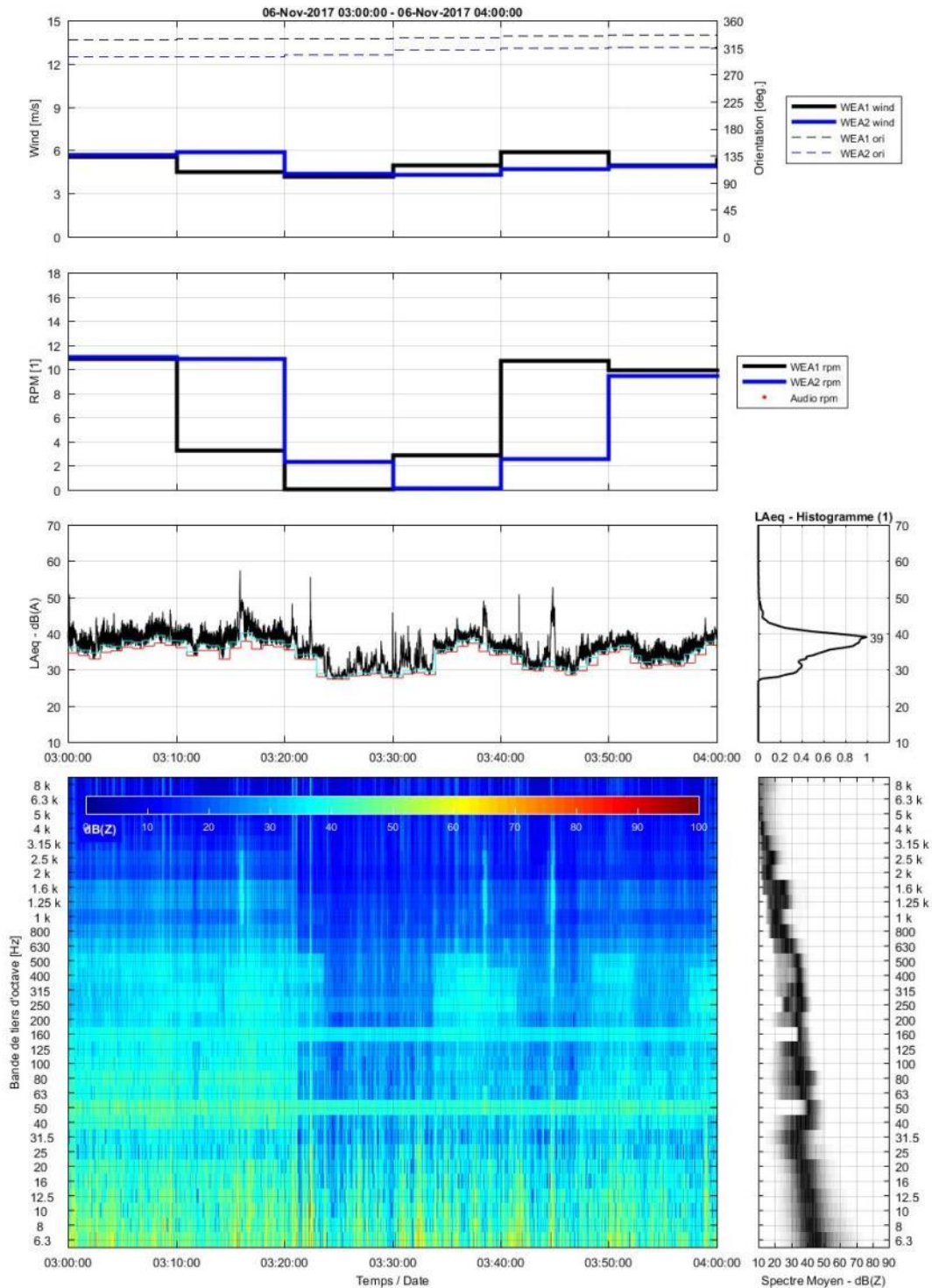


Serial Number - 10925  
Time Resolution - 0.125 s  
P17165

F:\Projets\2017\P17165\_Database\P17165-Mesures-Phase2\WEA1\20171106\_000000\_161013

## A4 – Rapport à l'immission LUS SUD – Phase n°2

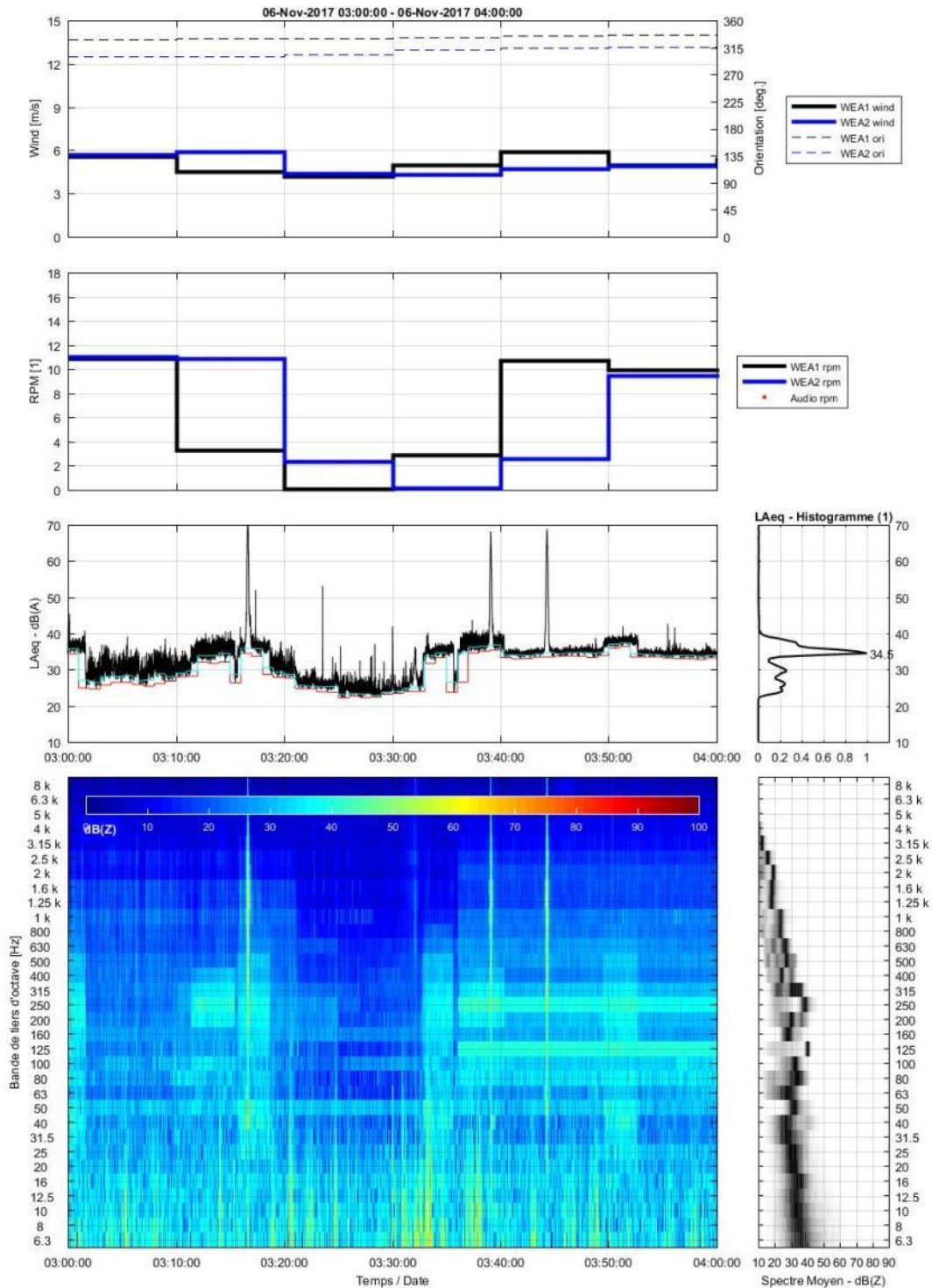
### LUS SUD PHASE n°2



Serial Number - 10592  
Time Resolution - 0.125 s  
P17165  
F:\Projets\2017\P17165\_Database\P17165-Mesures-Phase2\LUS\_SUD\20171106\_000000\_000000

## A5 – Rapport à l'immission LUS SUD – Phase n°2

### LUS NORD PHASE n°2



Serial Number - 10493  
Time Resolution - 0.125 s  
P17165  
F:\Projets\2017\P17165\_Database\P17165-Mesures-Phase2\LUS\_NORD\20171106\_000000\_000000



## A6 – Statistiques SCADA – Phase n°1

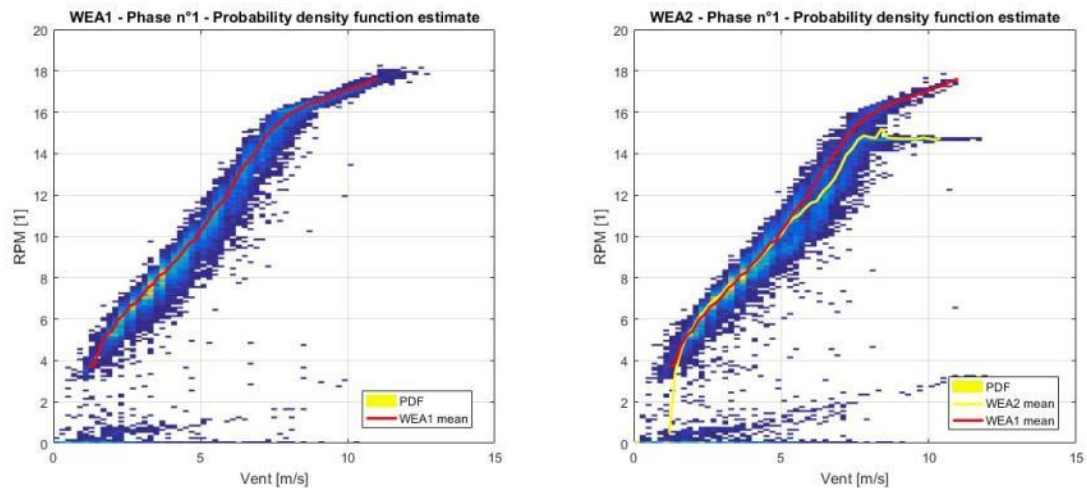


Figure 18: Statistiques Phase 1 : RPM vs vitesse vent

L'effet de bridage nocturne et la rose des vents sont les causes principales des différences des courbes statistiques moyennes pour la phase n°1

## A7 – Statistiques SCADA – Phase n°2

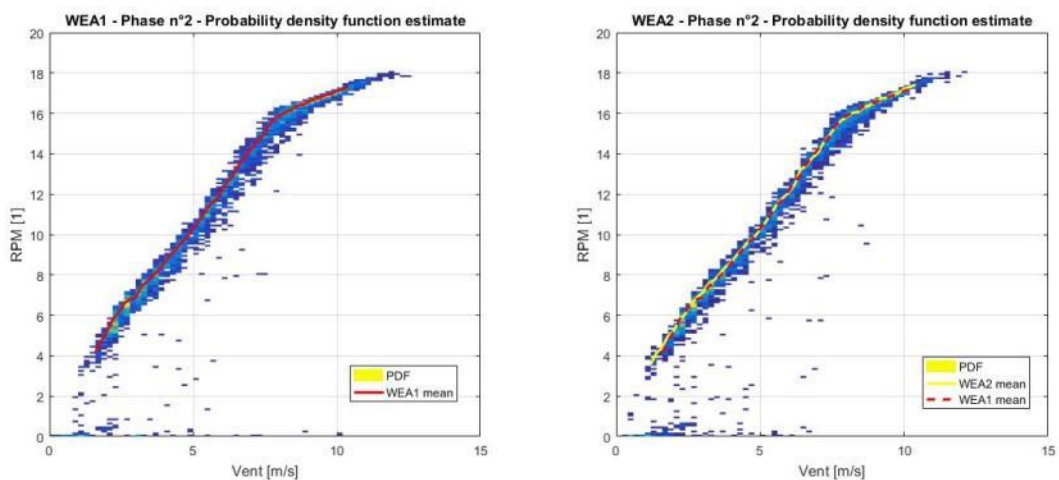


Figure 19: Statistiques Phase 2 : RPM vs vitesse vent

Les statistiques moyennes des deux éoliennes sont identiques.

## A8 – Comparaison LAeqmin vs Vitesse vent

LAeqmin ou Lmin : valeur minimale observée du LAeq pour une durée d'une minute

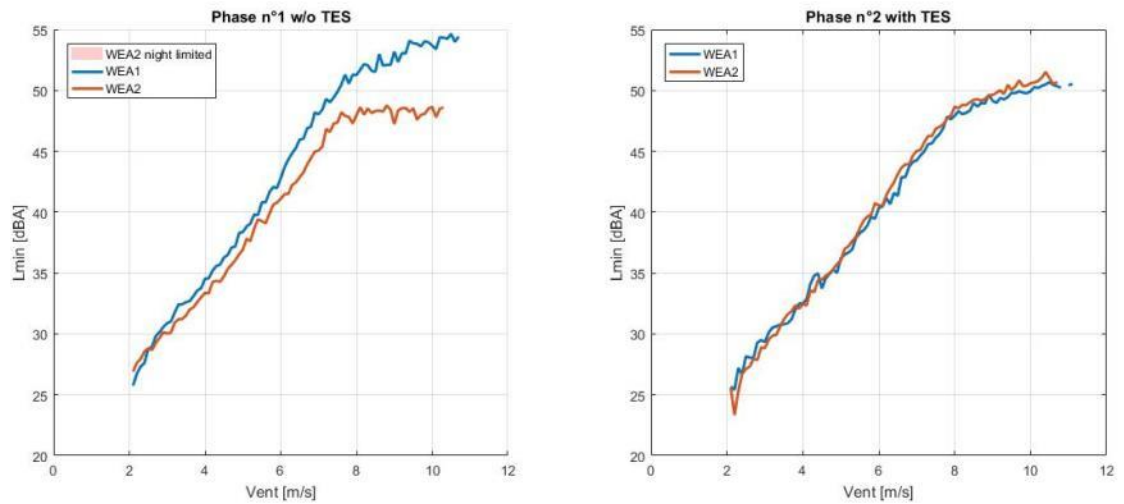


Figure 20: Comparaison des niveaux sonores des éoliennes WEA1 (Ouest) et WEA2 (Est) avant et après installation des TES

## A9 – Efficacité des TES - LAeqmin vs Vitesse vent

LAeqmin ou Lmin : valeur minimale observée du LAeq pour une durée d'une minute

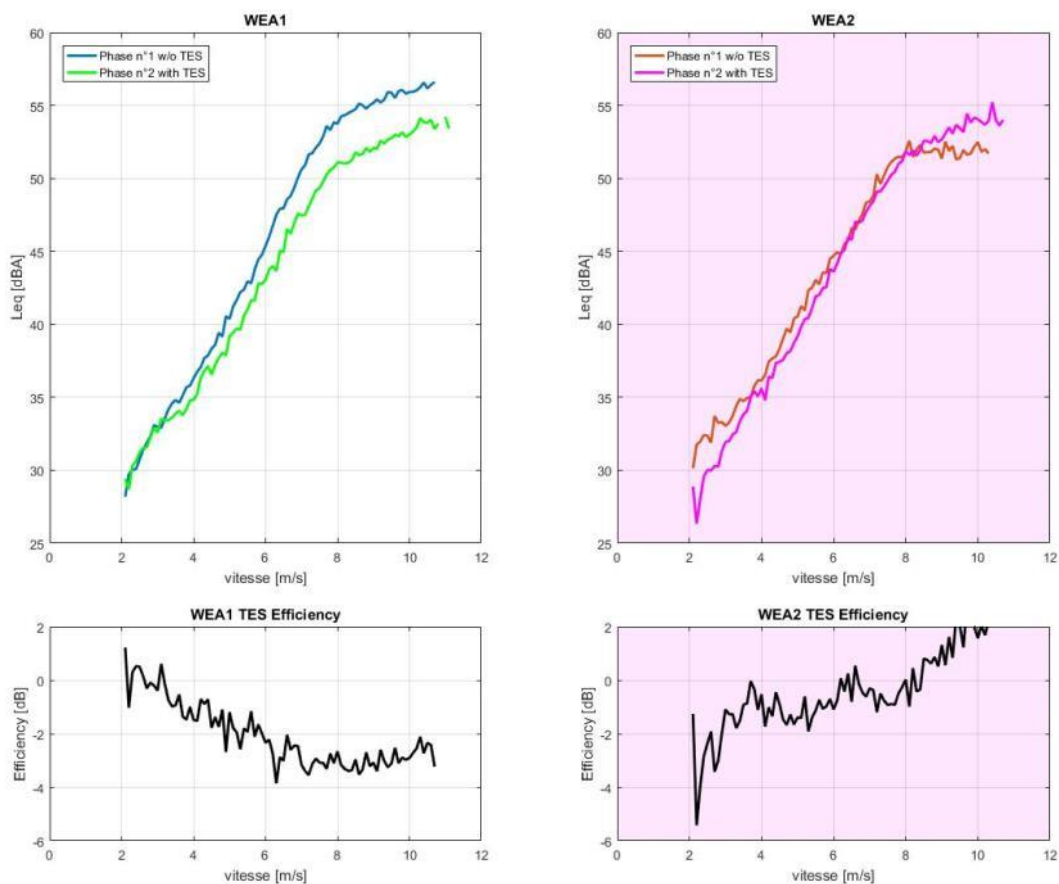


Figure 21: Haut: Niveaux sonores LAeqmin (1minute) selon vitesse de vent; bas: efficacité des TES vs vitesse de vent.

Les statistiques globales des niveaux sonores aux distances IEC61400-11 :2012 pour les deux périodes indiquent une efficacité avérée pour l'éolienne WEA1 (Ouest). Le bridage nocturne appliqué à l'éolienne WEA2 (Est) pendant la phase n°1 fausse la comparaison statistique.

## A10 – Spectres ENERCON E82

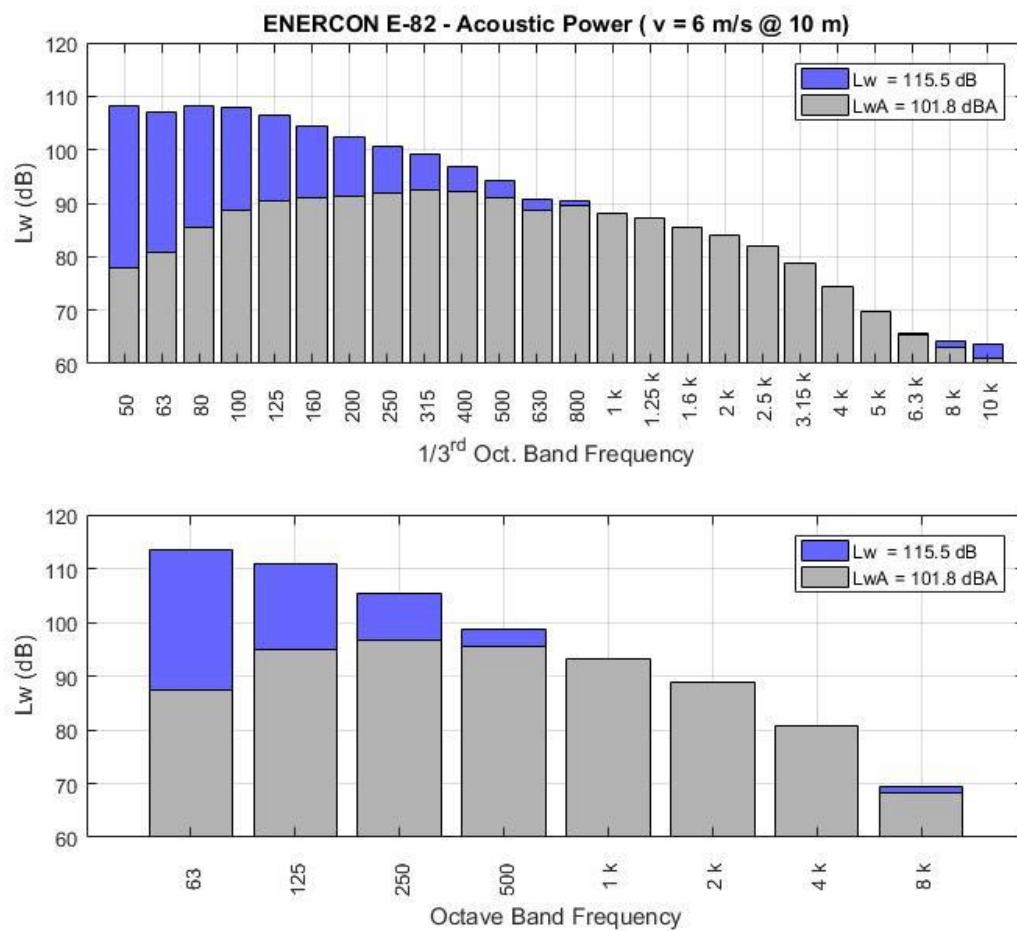
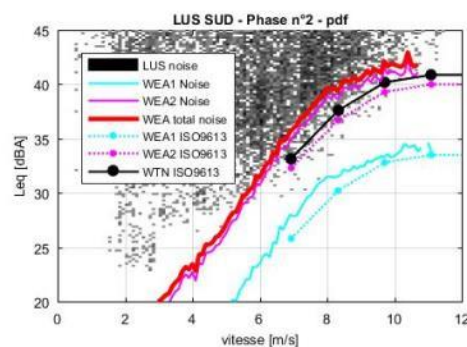
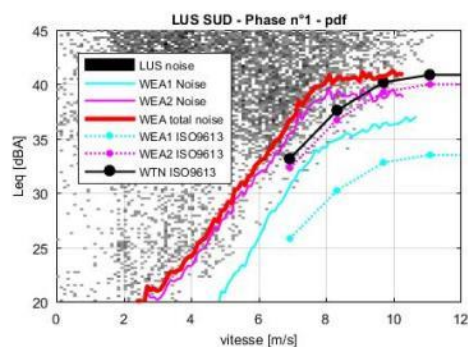
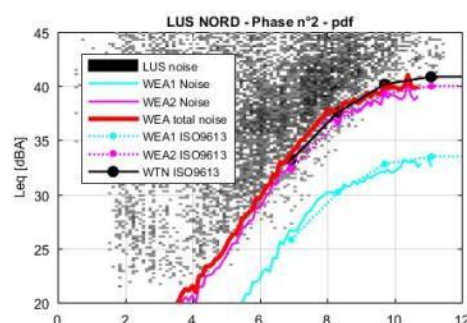
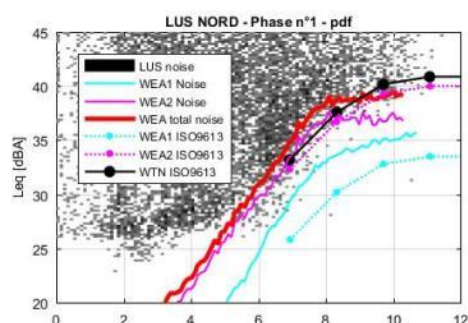
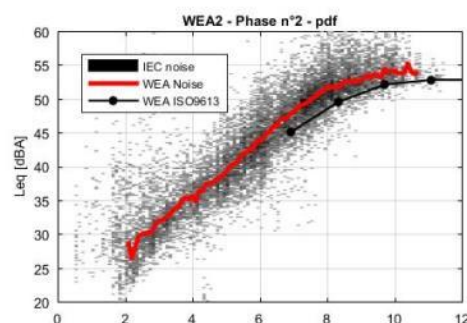
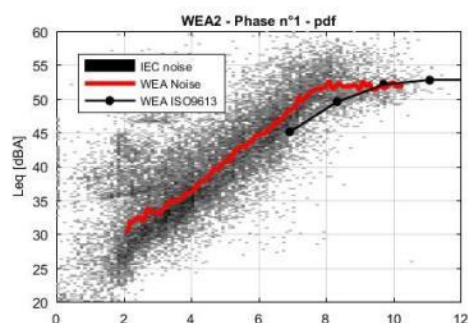
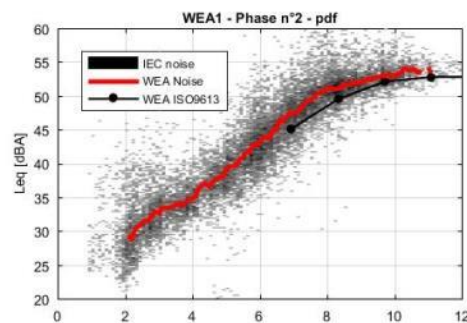
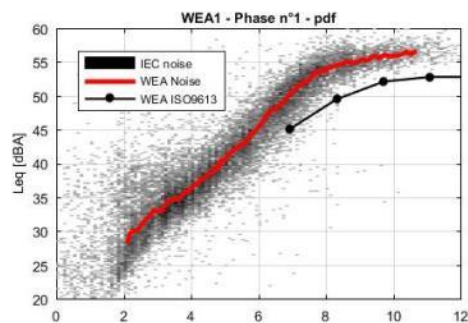


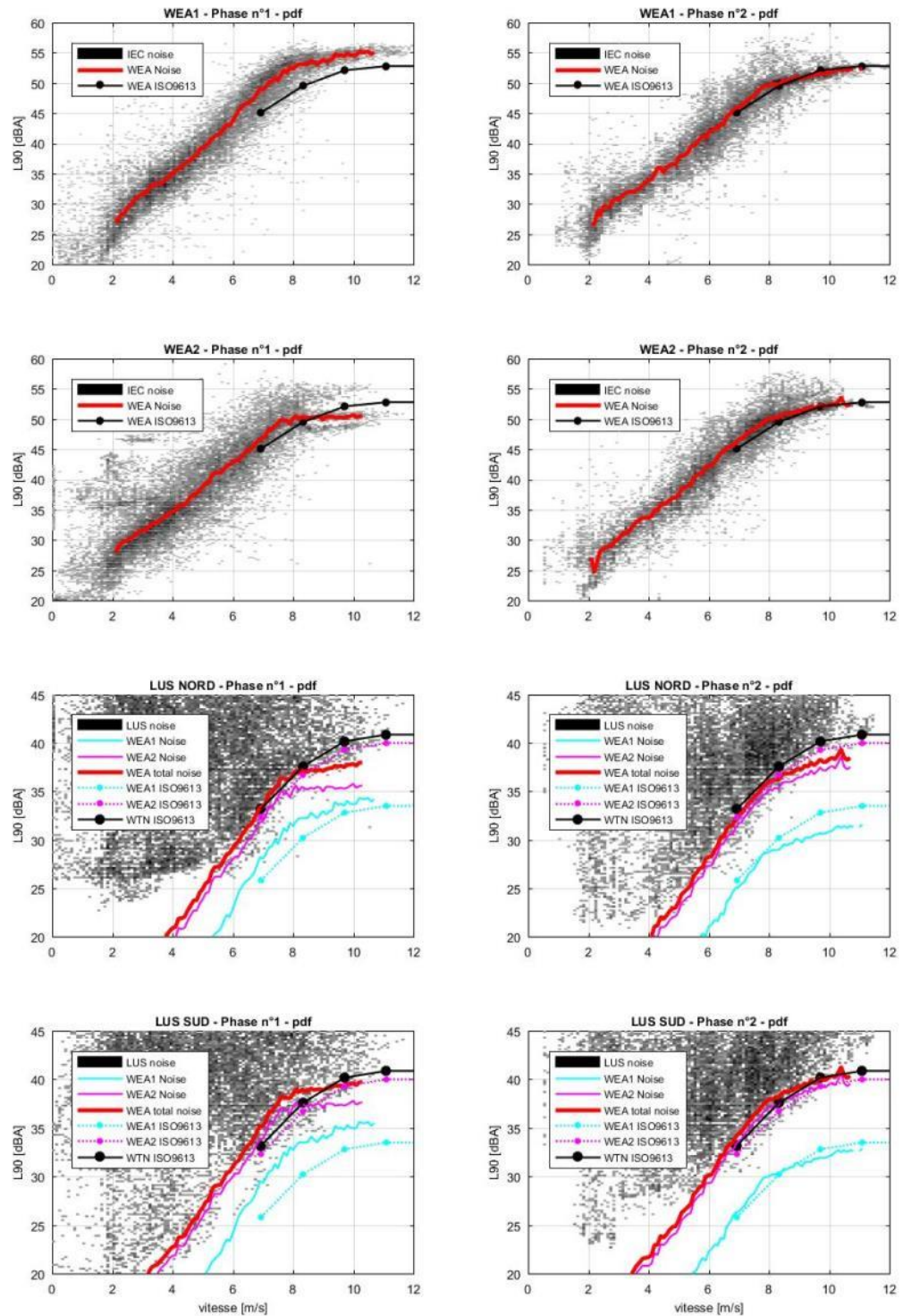
Figure 22: Données de puissances acoustiques ENERCON E82

## A11 – Statistiques LAeq vs Vitesse vent



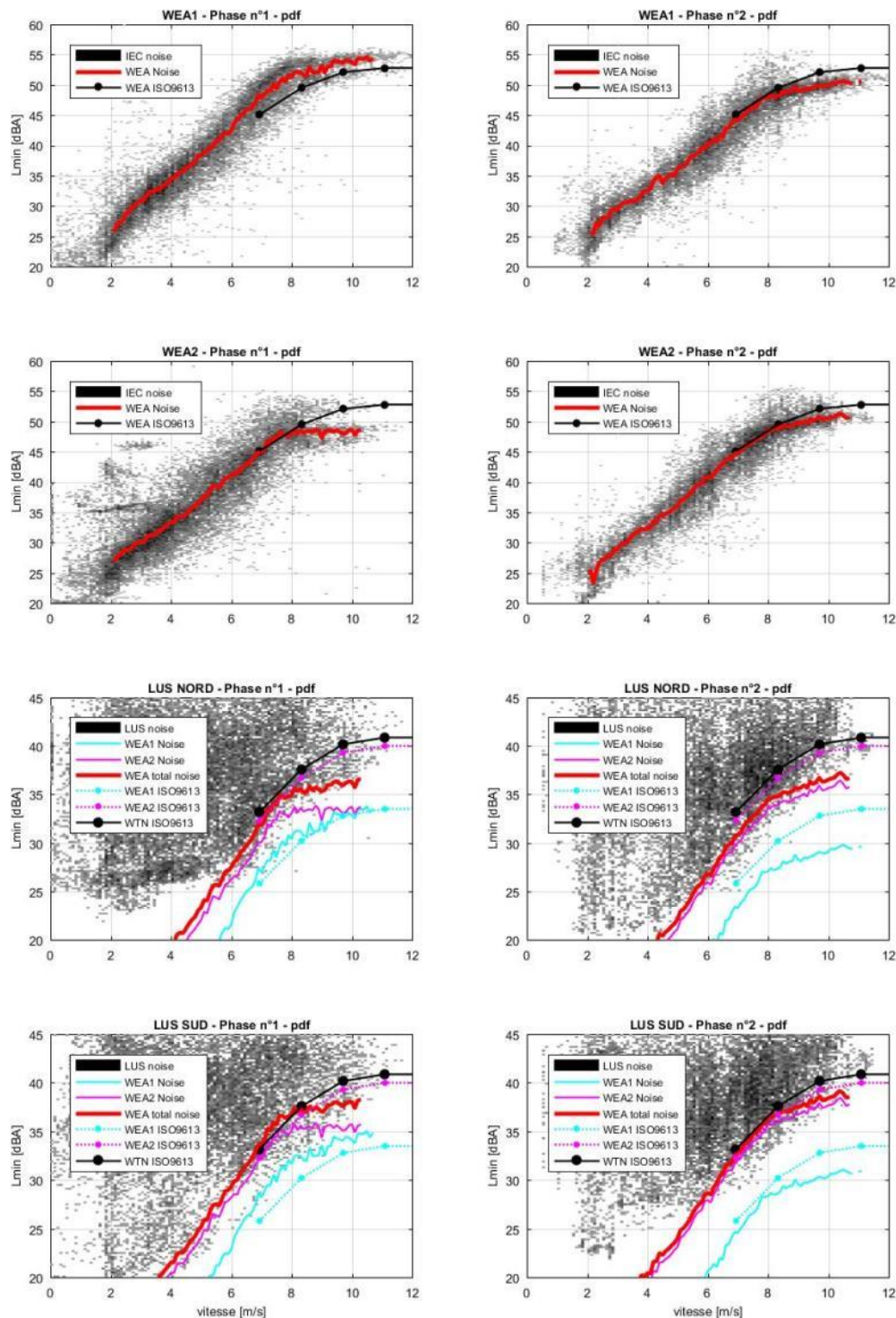


## A12 – Statistiques L90 vs Vitesse vent



## A13 – Statistiques LAeqmin vs Vitesse vent

LAeqmin ou Lmin : valeur minimale observée du LAeq pour une durée d'une minute





## A14 – Estimation du RPM depuis le LUS Sud – phase n°2

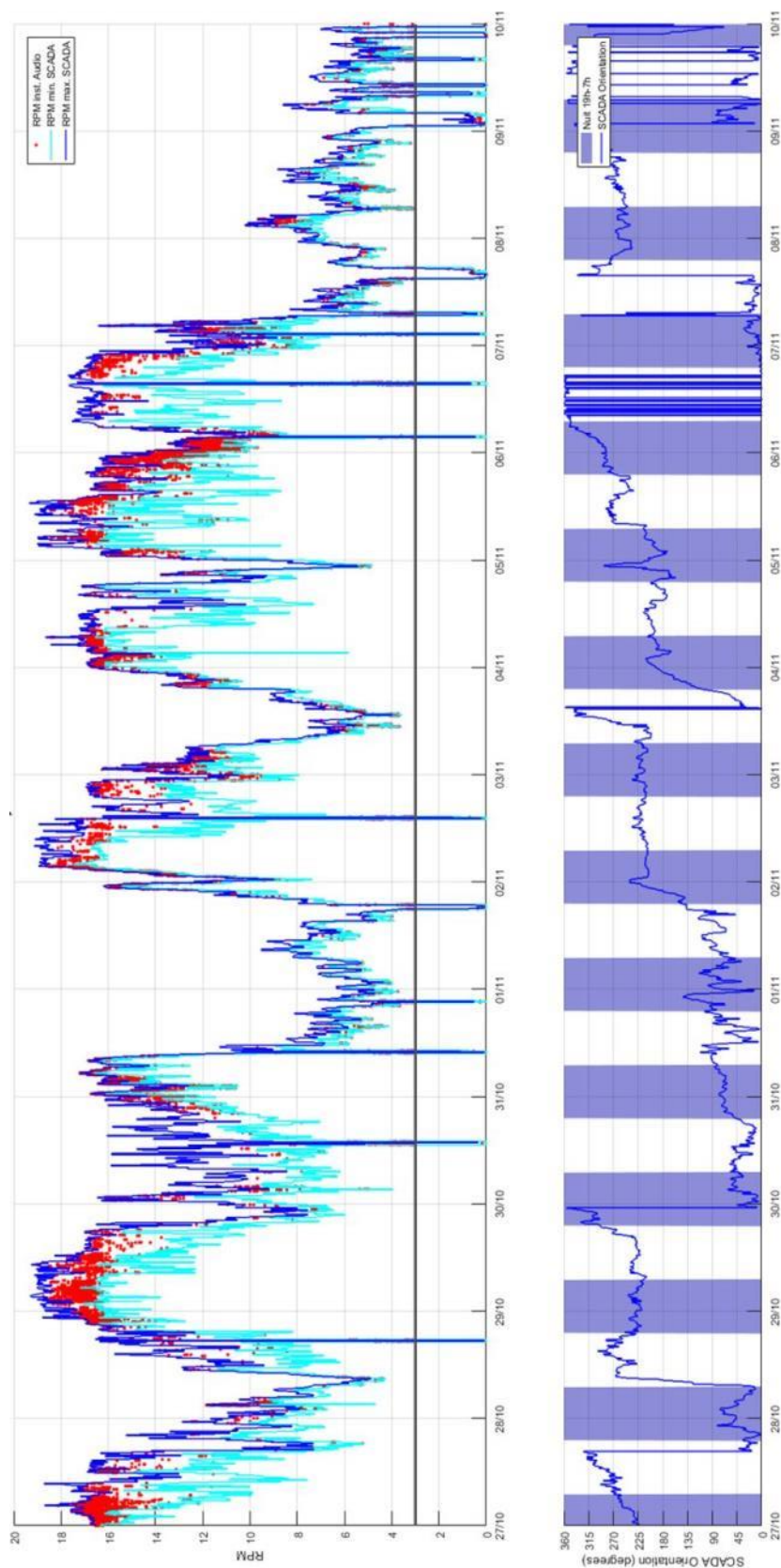
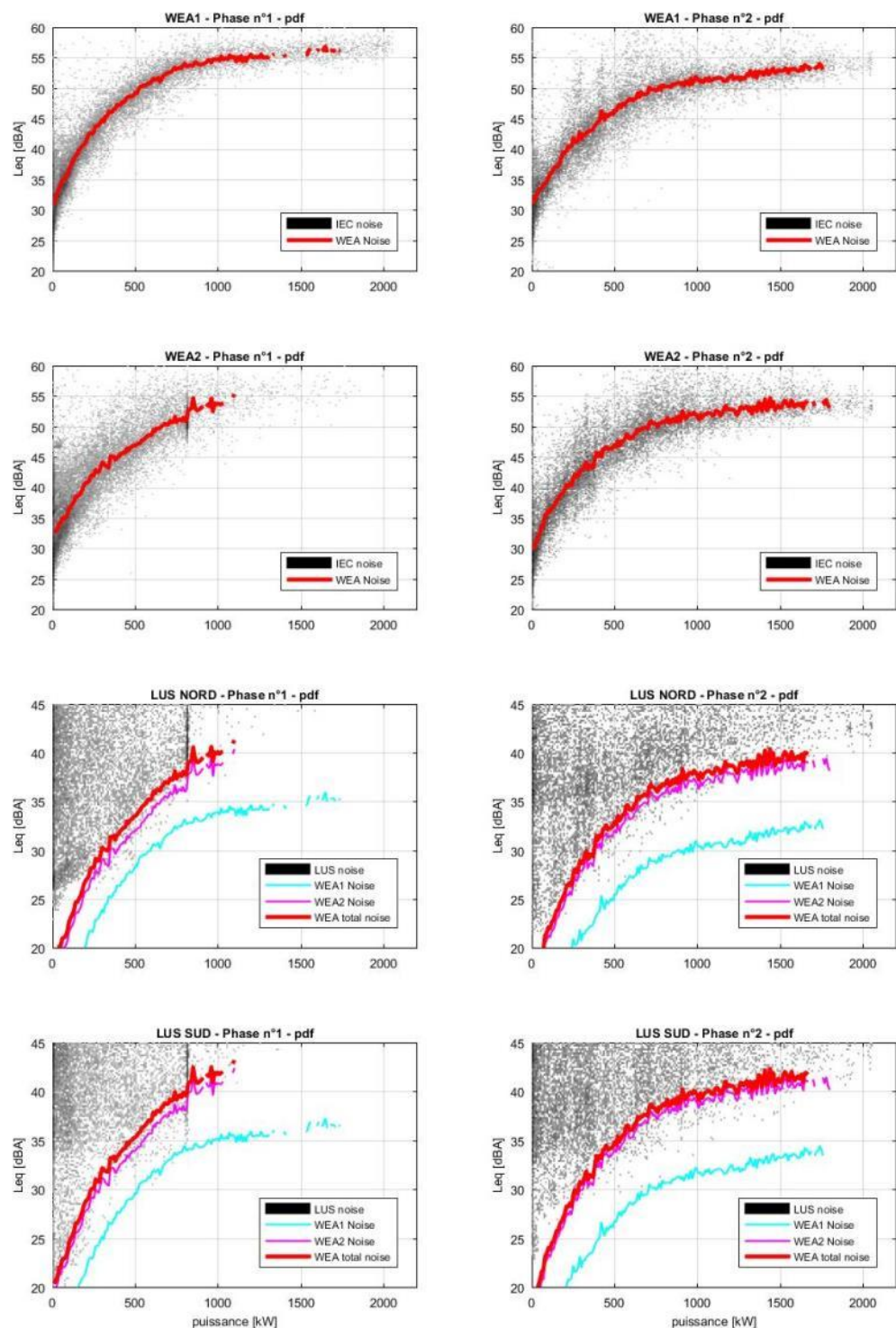
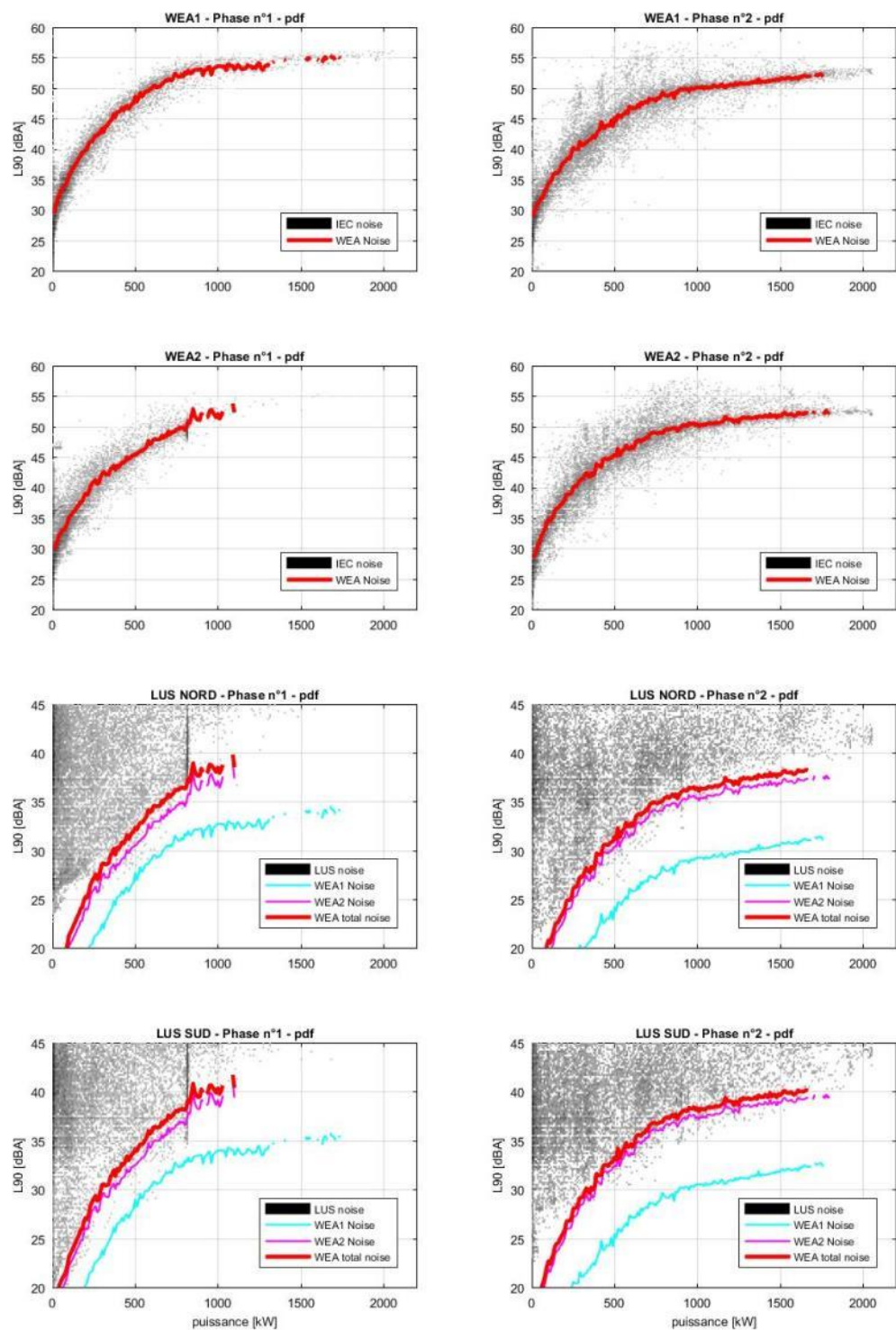


Figure 23: Evaluation de la vitesse de rotation RPM par analyse audio sur les données sonométriques du LUS Sud - Phase n°2

## A15 – Statistiques LAeq vs Power



## A16 – Statistiques L90 vs Power





## A17 – Statistiques LAeqmin vs Power

LAeqmin ou Lmin : valeur minimale observée du LAeq pour une durée d'une minute

