



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,  
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
**Office fédéral de l'énergie OFEN**

**Rapport final** de décembre 2016

---

# **Méthode d'évaluation du bruit des éoliennes**

## Comparaison entre modélisation et mesurage

---

**Mandant:**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme de recherche Energie éolienne  
CH-3003 Berne  
[www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)

**Mandataire:**

EcoAcoustique SA  
Av. de l'Université 24  
CH-1005 Lausanne  
[www.ecoacoustique.ch](http://www.ecoacoustique.ch)

**Auteurs:**

Dimitri Magnin, EcoAcoustique SA, [magnin@ecoacoustique.ch](mailto:magnin@ecoacoustique.ch)  
Ronan Fécelier, EcoAcoustique SA, [fecelier@ecoacoustique.ch](mailto:fecelier@ecoacoustique.ch)

**Responsable de domaine de l'OFEN:**

Katja Maus

**Chef du programme de l'OFEN:**

Lionel Perret

**Numéro du contrat de l'OFEN:**

SI/501150-01

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

# 1 Zusammenfassung

Die verschiedenen Methoden zur Ermittlung des Lärmes von Windkraftanlagen in der Schweiz - durch Computer-Modellierung und -Berechnung (in der Projektphase für neue Windparks) oder durch Messung vor Ort (existierender Windräderpark) - werden von den jeweils betroffenen Behörden und Organisationen (staatliche und kantonale Behörden, Suisse Eole ...) vielfach diskutiert. Die von der BAFU empfohlene Methode der Modellierung basiert auf dem EMPA-Bericht „Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen“ von 2010. Es gibt allerdings noch keine offizielle Methode zur Ermittlung des Lärms von Windkraftanlagen durch Messung in den bestehenden Standorten.

Um die Bewertung des Windkraftanlagenlärms zu verbessern, hat dieses Forschungsprojekt die aktuelle Schweizer Berechnungsmethode mit den Messergebnissen eines in Betrieb befindlichen Windkraftparks vor Ort verglichen.

Was die Messergebnisse betrifft, so bestätigt die vorgeschlagene Methode einige Elemente bezüglich des Materials (Windprotektion), die notwendige Dauer um die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen abzudecken (1 Monat), die zu dokumentierenden Parameter (Lärmpegel, Windgeschwindigkeit ...), die verwendbaren Zeitfenster (in der Nacht zwischen 22h00 und 04h00) so wie auch die örtliche Platzierung der Messung. Die Ergebnisse zeigten aber auch die Grenzen der Messmethode auf. Durch die standortspezifischen Gegebenheiten (auf einem Grat, stark dem Wind ausgesetzt), war es nicht möglich, den Lärm der Windkraftanlage vom Grundgeräusch präzise zu trennen, wenn auch der Windkraftlärm teilweise auf den Audioaufnahmen hörbar ist. Aufgrund der Nähe des Waldes und der Wind-Exponiertheit (auf dem Grat) ist das Grundgeräusch auf diesem Standort (vor allem der Geräusche des Windes in der Vegetation) relativ hoch. Durch diese Konfiguration ist der gemessene Lärmpegel eine Mischung aus dem Lärm der Windkraftanlagen und dem Grundgeräusch, selbst nach Ausblendung vieler Störgeräusche. Die unterschiedlichen getesteten Methoden (Auswahl von Perioden mit guter Hörbarkeit des Windkraftanlagenlärms, Analyse des Lärmpegels nach Terzbandoktaven, statistische Analyse  $L_{90}$ ) haben jedoch keine genauere Isolierung der akustischen Emissionen der Windkraftanlage erlaubt.

Was die Ergebnisse der Berechnungen ergibt, so ist die in der Schweiz empfohlene Methode zur Bestimmung des Windkraftanlagenlärms durchaus vergleichbar mit jenen der Nachbarländer. Alle diese Methoden haben einen vereinfachten Ansatz zur Lärmausbreitung adoptiert, der meist nicht die meteorologischen Effekte berücksichtigt. Die in der Schweiz vorgeschriebene Methode (ISO-Norm 9613-2 – modifiziert entsprechend der EMPA-Empfehlung) liefert Ergebnisse, die im allgemeinen 1 bis 3 dB(A) höher liegen als die am meisten angewandte internationale Norm (ISO 9613-2), da nur ein einziger Faktor bezüglich des Bodeneffekts zur Anwendung kommt.

Der Vergleich zwischen den Messergebnissen und der Modellierung zeigt, dass die allgemeinen durchschnittlich gemessenen Lärmpegel ( $L_{Aeq}$  jährlicher Tagesdurchschnitt) um 6 bis 8 dB(A) höher sind als die Werte, die aus der Modellierung stammen. Wenn man den Index  $L_{90}$  berücksichtigt, liegt die Differenz bei 4 bis 6 dB(A). Die Differenz zwischen den Messungen und der Modellierung ist vor allem bei einer erhöhten Windgeschwindigkeit ( $v > 7\text{m/s}$ ) beträchtlich. Diese grosse Differenz zwischen den Messergebnissen und den Berechnungsergebnissen erklärt sich hauptsächlich durch die durch die Störgeräusche überhöhten Messergebnisse (Wind in der Vegetation).

Um die Mess- und die Berechnungsmethode optimieren zu können wäre es notwendig, die Audio-Aufnahmen feiner zu analysieren (FFT-Analyse), die Daten zu vervollständigen durch eine komplementäre Mess-Serie mit angehaltenen Windkraftanlagen (« stop-and-go », wurde im derzeitigen Rahmen der Studie nicht genehmigt) und unterschiedlicher Platzierung der Messungen (auch in den Sektoren die weniger dem Wind ausgesetzt sind) sowie das Verfahren auf mehrere unterschiedliche Windparks auszuweiten.

## 2 Résumé

Les différentes méthodes d'évaluation du bruit des éoliennes en Suisse, que ce soit par modélisation informatique (projet de nouveau parc éolien) ou par mesurages in situ (parc éolien existant), font l'objet de nombreuses discussions au sein des différentes autorités et organismes concernés (Confédération, autorités cantonales, Suisse Eole...). La méthode de modélisation recommandée par l'OFEV se base sur le rapport de l'EMPA « Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen » de 2010. Quant à l'évaluation du bruit des éoliennes par mesurages sur des sites existants, il n'existe à ce jour pas de méthode officielle en Suisse.

Afin d'améliorer l'évaluation du bruit des éoliennes, ce projet de recherche a pour objectif principal de comparer, pour un parc éolien en service, la méthode de calcul actuellement employée en Suisse avec des résultats de mesurages in situ du bruit des éoliennes.

En ce qui concerne les résultats des mesurages, la méthode proposée a permis de valider un certain nombre d'éléments concernant le matériel et l'instrumentation (boule antivent), la durée nécessaire pour couvrir les différentes conditions météorologiques (1 mois), les différents paramètres à documenter (niveau sonore, vitesse du vent ...), les périodes utilisables (de nuit entre 22h00 et 04h00), ainsi que le choix des emplacements de mesurages. Ces résultats ont aussi montré les limites de la méthode de mesurages. En effet, étant donné les spécificités de ce site (situation sur la crête avec une forte exposition au vent), il n'y a pas été possible d'extraire précisément le bruit des éoliennes des bruits de fond, même si le bruit des éoliennes est partiellement audible sur les enregistrements audio. Les bruits de fond (principalement le bruit du vent dans la végétation) sont relativement élevés sur ce site du fait de la proximité de la forêt et de la situation très exposée au vent (sur la crête). Dans cette configuration, les niveaux sonores mesurés représentent le bruit de l'éolienne mélangés aux bruits de fond, même après suppression d'une grande quantité de bruits perturbateurs. Les différentes méthodes testées (choix de périodes avec une audibilité marquée du bruit des éoliennes, analyse des niveaux sonores par tiers d'octave, analyse statistique  $L_{90}$ ) n'ont pas permis d'isoler plus précisément le bruit des éoliennes.

En ce qui concerne les résultats des calculs, la méthode recommandée en Suisse pour déterminer le bruit des éoliennes est tout à fait comparable à celles utilisées dans les autres pays voisins. Toutes ces méthodes ont adopté une approche simplifiée de la propagation du bruit qui ne tient le plus souvent pas en compte des effets liés à la météorologie. La méthode préconisée en Suisse (norme ISO 9613-2 – modifiée selon recommandation EMPA) fournit globalement des résultats 1 à 3 dB(A) plus élevée que la norme internationale la plus couramment utilisée (ISO 9613-2) en raison de l'emploi d'un facteur unique concernant l'effet sol.

La comparaison entre les résultats des mesurages et de la modélisation montre que les niveaux sonores moyens globaux ( $L_{Aeq}$  moyenne annuelle de jour) obtenus par mesurages sont de 6 à 8 dB(A) plus élevés que les valeurs obtenues par modélisation. Si l'on tient compte de l'indice  $L_{90}$ , la différence est de 4 à 6 dB(A). La différence entre les mesurages et la modélisation est particulièrement importante avec une vitesse de vent élevée ( $v > 7$  m/s). Cet écart important entre les résultats des mesurages et les résultats des calculs s'explique principalement par le fait que les résultats des mesurages surévaluent le bruit des éoliennes étant donné la présence continue de bruit perturbateur (bruit du vent dans la végétation).

Afin de pouvoir optimiser la méthode de mesure et la méthode de calcul, il serait nécessaire de pouvoir effectuer des analyses plus fines des enregistrements audio (analyse FFT), de compléter les données avec une campagne de mesurages complémentaires avec l'arrêt de l'éolienne et plusieurs emplacements de mesurages (aussi dans des secteurs moins exposés au vent) et d'étendre ce procédé à plusieurs parcs éoliens.

### 3 Summary

The different evaluation-methods of the wind farm noise in Switzerland – computer models (project of new wind farms) or in-situ measurements (as for existing wind farms) are often discussed by the concerned authorities and organizations (federal and cantonal public authorities, Suisse Eole ...). For modeling the FOEN (Federal Office for the Environment) recommends the method based on the EMPA report “Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen” (2010). There is no official measuring method in Switzerland for the evaluation of the wind farms noise.

In order to improve the evaluation of the wind farm noise, this research project aims to compare the current Swiss calculation method with the results of in-situ measurements of a wind park.

The measurement-results of the allowed to validate some elements concerning material and instrumentation (windscreen), the minimum duration to cover the different meteorological conditions (1 month), the different parameters to be recorded (sound level, wind velocity ...), the relevant periods (between 22h00 and 04h00), as well as the measurement position. These results showed also the limits of the measurement-method. Given the particularity of the site (situation on a ridge with strong wind exposure), it was not possible to extract exactly the wind turbine noise from the background noise, even if the noise of the wind turbine is partially audible in the audio recordings. The background noise (mainly due to the wind in the vegetation) is quite high at this site because of the proximity of a forest and the wind-exposed location (on the ridge). In this configuration, the sound level measured represents the noise of the wind turbine mixed with the background noise, even with suppression of a lot of other interfering noises. The different methods tested (periods with high audibility of the wind turbine noise, third-band-analysis,  $L_{90}$  statistical analysis) did not allow to isolate the wind farm noise more exactly.

Concerning the calculation results, the recommended Swiss method to determine the noise of wind farms is comparable to those used in neighbouring countries. All these methods are based on a simplified approach of the noise propagation, which mostly does not take into account the meteorological effects. The results of the mandatory Swiss method (ISO-norm 9613-2 – modified according to EMPA recommendation) are usually 1 to 3 dB(A) higher than those obtained with the commonly used international norm (ISO 9613-2), because of the application of ground-connection-factor.

The comparison between the results of the measurement and the modeling shows that the average global sound level (annual averaged  $L_{Aeq}$  by day) obtained from the measurements is 6 to 8 dB(A) higher than the values obtained by the modeling. If one takes into account the index  $L_{90}$ , the difference is between 4 and 6 dB(A). With increasing wind speed ( $v > 7$  m/s) the difference between measurement and modeling is particularly high. This big discrepancy between measurement and calculation-results is principally due to the fact that the measured wind turbine noise is overrated by the presence of background noise (wind in the vegetation).

In order to optimize the methods of measurement and calculation, it would be necessary to perform a more detailed analysis (FFT) and to complete the data with complementary measurements while the wind turbine is interrupted (« stop-and-go », not accorded in the frame of the current project) and with several measurement-positions (also in the areas less exposed to wind) and to extend the procedure to several wind parks.

# Table des matières

1	Zusammenfassung .....	3
2	Résumé .....	4
3	Summary .....	5
4	Contexte .....	7
5	Objectif .....	7
6	Procédure / méthodologie .....	8
6.1	Méthode de mesurage .....	8
6.1.1	Test de différents systèmes de mesurage et des performances des boules anti-vent.....	8
6.1.2	Météo.....	12
6.2	Méthode de calcul .....	13
6.2.1	Introduction.....	13
6.2.2	ISO 9613-2 .....	13
6.2.3	ISO 9613-2 (modifié EMPA).....	14
6.2.4	Ljud från vindkraftverk .....	15
6.2.5	Nord 2000.....	15
6.2.6	Crossos-EU .....	15
6.2.7	Harmonoise .....	16
6.3	Emplacements de mesurages.....	17
7	Résultats.....	18
7.1	Introduction.....	18
7.2	Mesurages.....	18
7.2.1	Données météorologiques .....	18
7.2.2	Mesurages des niveaux sonores.....	18
7.2.3	Bruits perturbateurs .....	20
7.2.4	Validation des données .....	20
7.2.5	Regroupement par phase de vent.....	20
7.2.6	Niveaux sonores globaux .....	21
7.2.7	Bruit des éoliennes .....	25
7.2.8	Conclusion sur les mesurages .....	30
7.3	Méthodes de calcul.....	31
7.3.1	ISO 9613-2 .....	31
7.3.2	ISO 9613-2 (modifié EMPA).....	33
7.3.3	Ljud från vindkraftverk .....	33
7.3.4	Nord 2000.....	33
7.3.5	Crossos-EU .....	34
7.3.6	Harmonoise .....	34
7.3.7	Comparaison des méthodes de calcul .....	36
7.3.8	Conclusion des méthodes de calcul.....	39
8	Evaluation des résultats .....	40
8.1	Comparaison mesurages/calculs .....	40
8.2	Perspectives .....	42
9	Conclusions .....	43
10	Références .....	44

## 4 Contexte

Les différentes méthodes d'évaluation du bruit des éoliennes en Suisse, que ce soit par calcul informatique (projet de nouveau parc éolien) ou par mesurages in situ (parc éolien existant), font l'objet de nombreuses discussions au sein des différentes autorités et organismes concernés (Confédération, cantons, Suisse Eole...).

La méthode de modélisation recommandée par l'OFEV [1] se base sur le rapport de l'EMPA « Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen » de 2010 [2]. Cette méthode présente l'avantage d'être relativement simple, mais a tendance à surestimer le bruit engendré par les éoliennes. Quant à l'évaluation du bruit des éoliennes par mesurages sur des sites existants, il n'existe à ce jour pas de méthode officielle en Suisse.

Les projets de recherche dans le domaine du bruit des éoliennes sont peu nombreux en Suisse et leurs résultats ne sont pas encore tous publiés (voir chapitre 10 Références – Etudes suisses). Les projets de recherche à l'international sont nombreux (voir en particulier les articles les plus récents publiés lors du congrès Wind Turbine Noise de Glasgow en avril 2015, chapitre 10 Références), mais leurs résultats ne sont pas toujours applicables au contexte Suisse (topographie, législation spécifique...).

Du point de vue législatif, l'OFEV prépare pour 2017 une nouvelle recommandation concernant les études d'impact sur l'environnement dans le cas des parcs éoliens.

## 5 Objectif

Afin d'améliorer l'évaluation du bruit des éoliennes, ce projet de recherche a pour objectif principal de comparer la méthode de calcul actuellement employée en Suisse avec des résultats de mesurages longue durée du bruit d'éoliennes.

Dans ce but, il s'agit de comparer, sur un parc éolien en exploitation, les niveaux sonores du bruit des éoliennes obtenus par modélisation avec ceux obtenus par mesurages in-situ. Pour cela, il est essentiel d'utiliser différentes méthodes de modélisation et d'intégrer toutes les influences acoustiques (topographie, végétalisation, environnement construit, météorologie...); quant aux mesurages, il faut les effectuer sur une durée suffisamment longue pour documenter les variations de vitesses et d'orientations du vent.

Dans le cadre de ce projet, il a volontairement été choisi de se limiter à des méthodes de mesurages relativement simples, avec l'utilisation d'appareils standards (appareillage utilisé par les bureaux d'ingénieurs et par les autorités chargées des contrôles), ainsi qu'aux méthodes de calcul usuelles dans le milieu de l'ingénierie sans faire appel à des méthodes plus complexes utilisées principalement par les organismes de recherche (simulations par ray-tracing...). De plus, la durée des mesurages est volontairement limitée (1 mois sur une seule période) de manière à obtenir des résultats rapidement.

## 6 Procédure / méthodologie

Ce chapitre présente le descriptif des différentes méthodologies utilisées dans le cadre de cette étude, pour les techniques de mesurages (chapitre 6.1) et pour les méthodes de calcul (chapitre 6.2), ainsi que les informations générales liées aux emplacements de mesurages (chapitre 6.3).

### 6.1 Méthode de mesurage

La méthode de mesurage proposée dans ce projet de recherche a pour objectif prioritaire de rester simple. Afin de compenser les fortes fluctuations des niveaux de bruit des éoliennes (en particulier les turbulences dues au vent,...), une approche statistique sur une longue durée de mesurage a été privilégiée pour obtenir une meilleure représentativité des résultats.

Les mesurages des niveaux sonores à l'extérieur dans le cas des éoliennes posent en plus un certain nombre de problème comme par exemple : le bruit de la pluie, du vent au niveau du microphone, du vent dans les arbres...

Pour être conforme à la norme ISO 1996-2:2007 « Méthode générale pour le mesurage du bruit à l'extérieur » [3], les conditions météorologiques devraient être les suivantes :

- vent dans un angle de  $\pm 60^\circ$  le jour et  $\pm 90^\circ$  la nuit par rapport à la direction source récepteur
- vitesse du vent mesuré à une hauteur entre 3 et 11 m par rapport au sol, entre 2 et 5 m/s au cours de la journée et avec 0.5 m/s en plus pour la nuit
- pas de fort gradient de température négatif proche du sol

La plupart du temps, les critères de la norme ISO 1996-2 sont respectés lors des mesurages. Lorsque ceux-ci ne sont pas respectés les valeurs acoustiques ont été supprimées (en particulier lorsque la vitesse du vent est trop élevée).

La norme française NF S 31-010 de 1996 « Acoustique – Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Méthodes particulières de mesurage » [4] considère que les conditions métrologiques peuvent influencer sur les résultats de deux manières :

- Par perturbation des mesurages, en particulier par action sur le microphone. Il convient alors de ne pas faire de mesurage quand la vitesse du vent est supérieure à 5 m/s, ou en cas de pluie marquée,
- Lorsque la (les) source(s) de bruit est(ont) éloigné(e)s. Le niveau de pression acoustique mesuré dépend alors des conditions de propagation qui varient fortement suivant la météorologie. Cette influence est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de la source.

#### 6.1.1 Test de différents systèmes de mesurage et des performances des boules anti-vent

Afin de vérifier l'adéquation entre le matériel choisi pour les mesurages et les conditions in-situ (vent fort), différents tests ont été effectués préalablement sur les systèmes de microphone. Il s'agit de vérifier en particulier :

- À partir de quelle vitesse de vent (flux d'air), les microphones enregistrent des perturbations ? (voir chapitre 6.1.1.1 Bruit du vent)
- Quelles est l'atténuation des boules anti-vent ? (voir chapitre 6.1.1.2 Réponse fréquentielle)

Les fournisseurs de matériel de mesurage proposent différents systèmes, mais sans fournir toutefois de données suffisantes par rapport au bruit du vent et à la réponse fréquentielle de leur système. Nous n'avons pu obtenir des informations que pour la seule double boule anti-vent fournie par l'entreprise Norsonic (Nor 1216 + CA 4575).

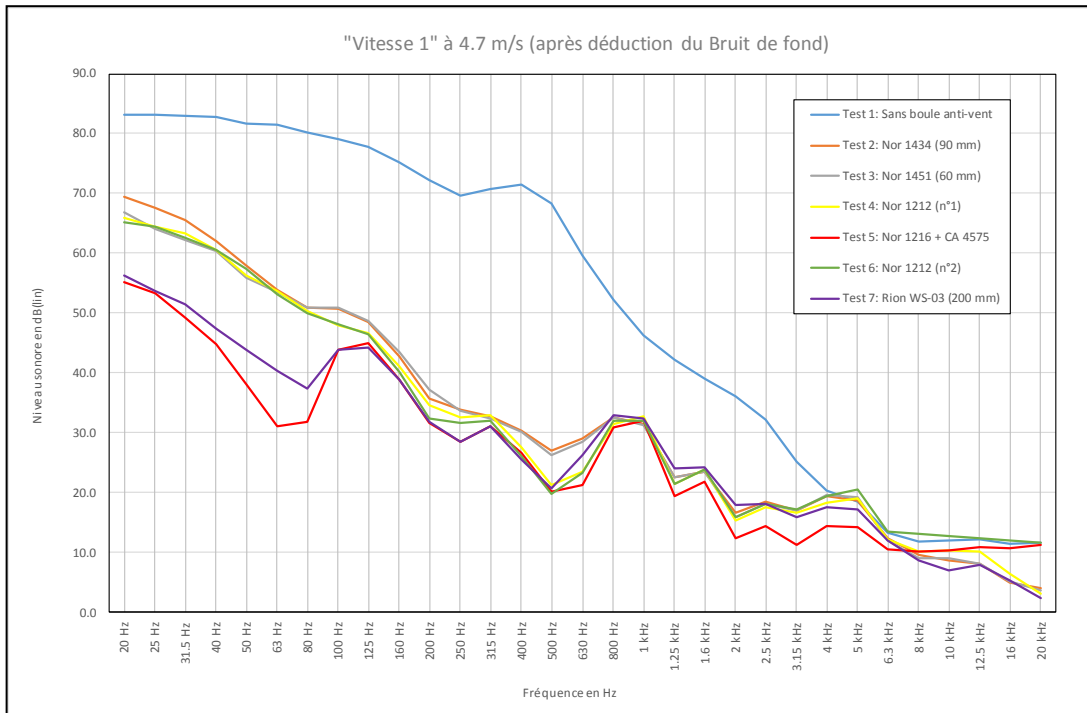
Nous avons donc décidé de tester 5 modèles de boules anti-vent (modèles disponibles sur le marché) :

- Boules anti-vent standard fournies par défaut avec le sonomètre (Norsonic 140) : diamètre 60 mm (Nor 1451) et 90 mm (Nor 1434)
- Boule anti-vent spéciale extérieur (Nor 1212)
- Boule anti-vent avec un diamètre de 200 mm (Rion WS 03)
- Double boule anti-vent (Nor 1216 + CA 4575)

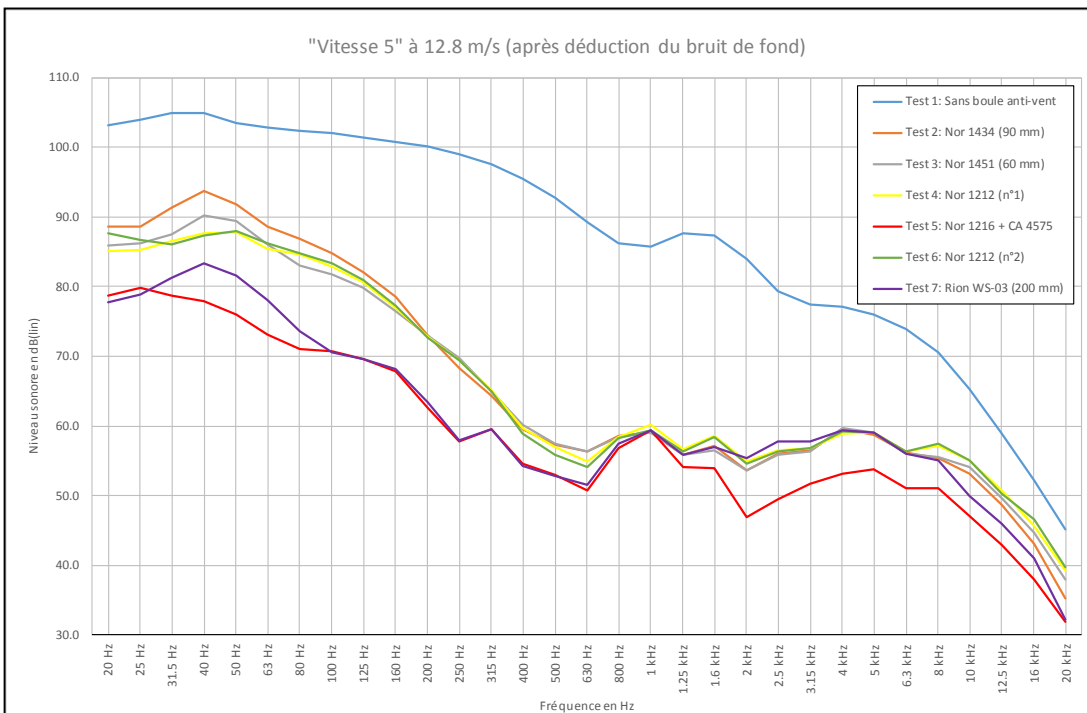
### 6.1.1.1 Bruit du vent

Les boules anti-vent ont été testées en conditions contrôlées dans l'entreprise Climatec à l'aide d'un ventilateur Hélios type SB 315C et d'un silencieux. La vitesse 1 (4.7 m/s, vitesse minimale) correspond à la valeur limite pour des boules anti-vent standard selon les données des fournisseurs (~5 m/s). La vitesse 5 (12.8 m/s, vitesse maximale) correspond à la vitesse maximum du ventilateur mais également aux vitesses maximum du vent mesurées à proximité du sol.

Les graphiques suivants (graphiques 1 et 2) montrent le détail des mesurages des différentes boules anti-vent, pour les vitesses de 4.7 m/s (vitesse minimale) et de 12.8 m/s (vitesse maximale) avec un domaine de fréquence de 20 Hz à 20 kHz (après déduction du bruit de fond) en dB(lin) et en dB(A).



Graphique 1 : Niveau sonore en dB(lin) à une vitesse de 4.7 m/s

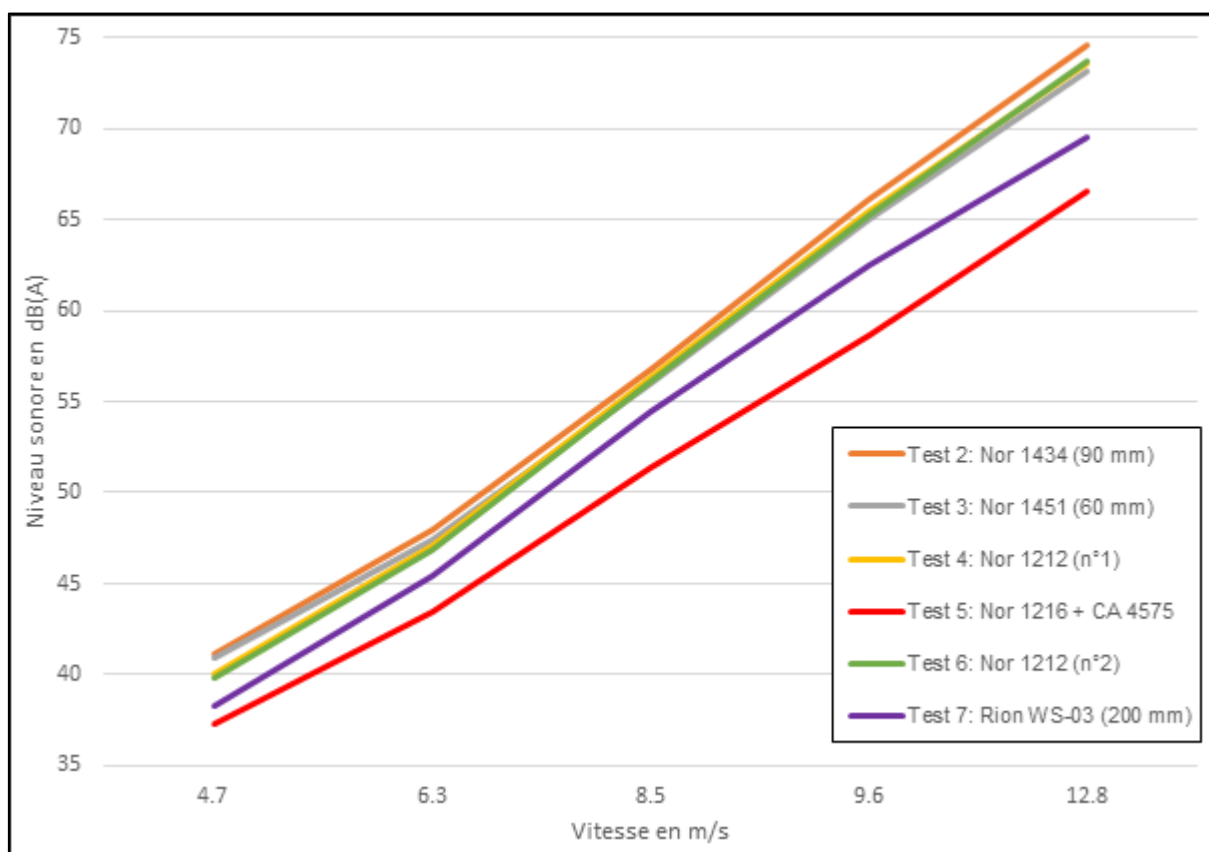


Graphique 2 : Niveau sonore en dB(lin) à une vitesse de 12.8 m/s

Le tableau ci-dessous résume les niveaux sonores en dB(Lin) et dB(A) des différentes boules anti-vent en fonction des différentes vitesses du flux d'air.

Type de boule	Niveau sonore	Vitesse de l'air en m/s				
		4.7	6.3	8.5	9.6	12.8
Test 1: Sans boule anti-vent	dB(Lin)	92	96	102	108	114
	dB(A)	<b>73</b>	<b>79</b>	<b>86</b>	<b>93</b>	<b>100</b>
Test 2: Nor 1434 (90 mm)	dB(Lin)	73	80	88	94	99
	dB(A)	<b>41</b>	<b>48</b>	<b>57</b>	<b>66</b>	<b>75</b>
Test 3: Nor 1451 (60 mm)	dB(Lin)	70	77	84	91	96
	dB(A)	<b>41</b>	<b>47</b>	<b>56</b>	<b>65</b>	<b>73</b>
Test 4: Nor 1212 (n°1)	dB(Lin)	70	76	83	89	95
	dB(A)	<b>40</b>	<b>47</b>	<b>56</b>	<b>65</b>	<b>74</b>
Test 5: Nor 1216 + CA 4575	dB(Lin)	59	64	70	76	86
	dB(A)	<b>37</b>	<b>44</b>	<b>51</b>	<b>59</b>	<b>67</b>
Test 6: Nor 1212 (n°2)	dB(Lin)	70	76	83	90	96
	dB(A)	<b>40</b>	<b>47</b>	<b>56</b>	<b>65</b>	<b>74</b>
Test 7: Rion WS-03 (200 mm)	dB(Lin)	60	69	74	81	89
	dB(A)	<b>38</b>	<b>45</b>	<b>54</b>	<b>63</b>	<b>70</b>

Tableau 1 : synthèse des niveaux sonores selon différentes boules en fonction de la vitesse de l'air



Graphique 3 : niveau sonore en fonction des vitesses de vent

Les résultats (graphique 3) montrent que les boules standards 60 mm (Nor 1451), 90 mm (Nor 1434) et la boule extérieure (Nor 1212) sont équivalentes quelle que soit la vitesse du vent. Toutes les boules sont équivalentes entre 125 Hz à 6.3 kHz pour une vitesse de vent de 4.7 m/s tandis qu'à 9.6 m/s elles sont équivalentes seulement de 500Hz à 1.6 kHz. On remarque aussi que le niveau sonore est proche de 40 dB(A) pour l'ensemble des boules anti-vent à 4.7 m/s.

Dans les basses fréquences, la double boule (Nor 1216 + CA 4575) et la boule de 200 mm (WS 03) permettent de réduire les bruits perturbateurs de 10 à 15 dB par rapport aux boules standard. Dans les hautes fréquences, seule la double boule (Nor 1216 + CA 4575) permet de réduire le bruit du flux d'air d'environ 5 dB.

**Les systèmes les plus efficaces pour limiter le bruit du flux d'air sont la double boule (Nor 1216 + CA 4575) suivi de la boule de 200 mm (WS 03).**

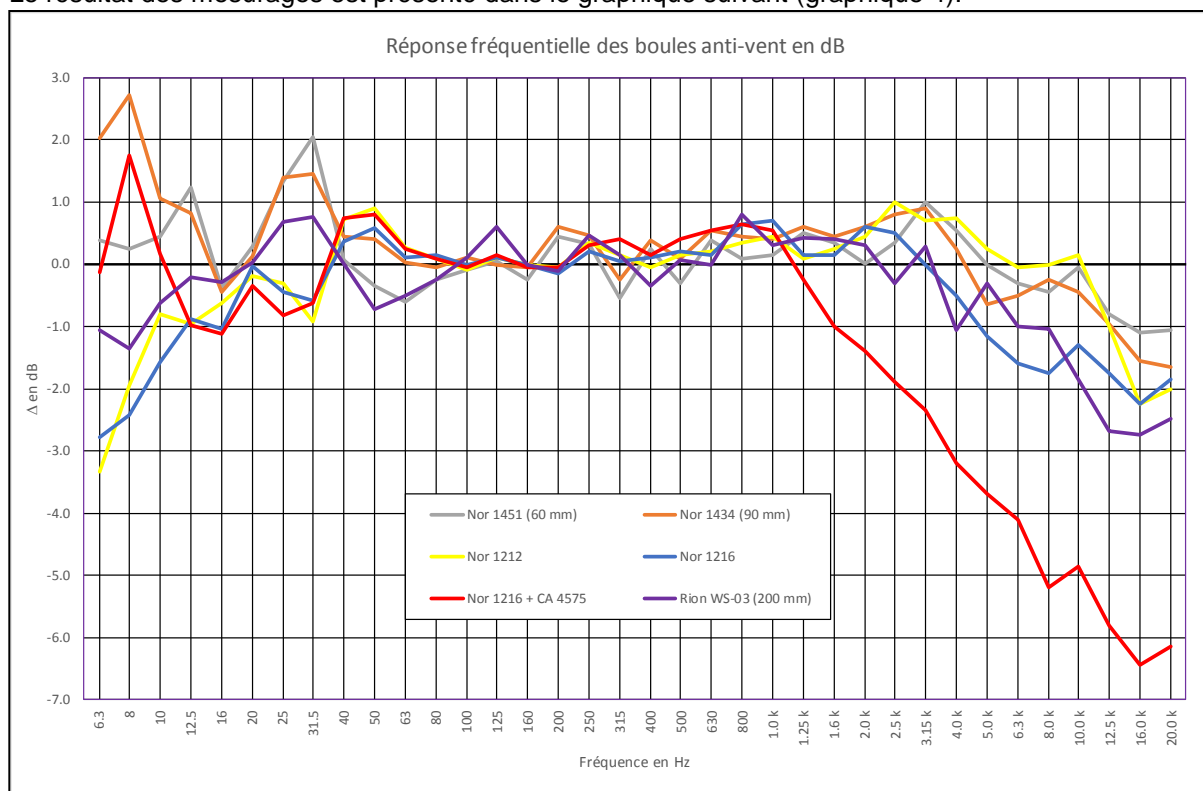
**Le système de mesurage mis en place sera donc le suivant (3 microphones) :**

- La double boule anti-vent (Nor 1216 + CA 4575) sera placée à 9 m de hauteur (emplacement le plus exposé au vent)
- Les boules anti-vent Nor 1212 et WS 03 seront prévus à 4.5 m de hauteur (emplacements moins exposés au vent)

### 6.1.1.2 Réponse fréquentielle

La réponse fréquentielle permet de déterminer l'atténuation du bruit lié à la mousse des boules anti-vent. Nous avons tenu à vérifier la réponse fréquentielle des boules anti-vent à l'aide d'une source sonore et d'un générateur de bruit rose. Les mesurages ont été effectués avec un sonomètre analyseur de fréquence Norsonic 140 calibré par une source étalon Brüel et Kjaer 4231 (appareils homologués par le Metas). La plage de fréquence est de 6.3 Hz à 20 kHz.

Le résultat des mesurages est présenté dans le graphique suivant (graphique 4).



Graphique 4 : Réponse fréquentielle des boules anti-vent

On remarque que les boules anti-vent sont équivalentes ( $\pm 1$  dB) de 40 Hz à 1 kHz. La double boule atténue davantage le bruit à partir de 1 kHz jusqu'à 20 kHz (atténuation marquée dans les hautes fréquences).

**Dans le cas de la double boule (Nor 1216 + CA 4575) et en tenant compte du spectre type du bruit d'une éolienne, la correction du niveau sonore global  $L_{Aeq}$  est de 0.3 dB(A) essentiellement dans les hautes fréquences. Pour les autres boules, aucune correction n'est nécessaire.**

## 6.1.2 Météo

Il existe de nombreux facteurs affectant la propagation du bruit, notamment le type de source, l'éloignement par rapport à la source, l'absorption atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, la température et les gradients de température, la présence d'écrans acoustiques ou de bâtiments, la nature et l'état du sol, les réflexions acoustiques, l'humidité relative, les précipitations...

La météo joue un rôle important dans le cas du bruit des éoliennes, en particulier la vitesse et la direction du vent. Au sol, le vent est fortement freiné par des obstacles et par des accidents de terrain. A une certaine hauteur, le vent ne subit plus l'influence de la surface du sol. Entre les deux, la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur. Ce phénomène est connu sous la désignation de cisaillement vertical du vent. Au-dessus d'un terrain plat et avec une stratification atmosphérique neutre, le profil logarithmique du vent permet une bonne approximation du cisaillement vertical.

Lors des mesurages in situ, la vitesse du vent a été mesurée à différentes hauteurs (4.5 m, 9 m et 108 m). Afin de pouvoir comparer ces valeurs, nous avons utilisé la vitesse de référence ( $v_0$ ) à une hauteur de 10m comme valeur standard selon la formule ci-dessous (selon le projet de norme NFS 31-114 [5]) pour passer de  $v_1$  (108 m) à  $v_2$  (10 m) :

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (\text{éq.1})$$

Avec

$h_2$  (hauteur du mât de l'éolienne)= 108 m

$h_1$  (hauteur de référence)= 10 m

$z_0$  (longueur de rugosité de référence)= 0.05 m

$v_1$  (vitesse mesurée au sommet du mât de l'éolienne) (en m/s)

$v_2$  (vitesse de référence) vitesse à 10 m (en m/s)

La valeur ( $v_0$ ) est aussi celle fournie en relation avec la puissance acoustique théorique des éoliennes.

La figure 1 présente un exemple de profil de vent (outil de calcul disponible sur [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch)) pour une vitesse de vent de 5 m/s à une hauteur de 10 m (avec la rugosité de référence).

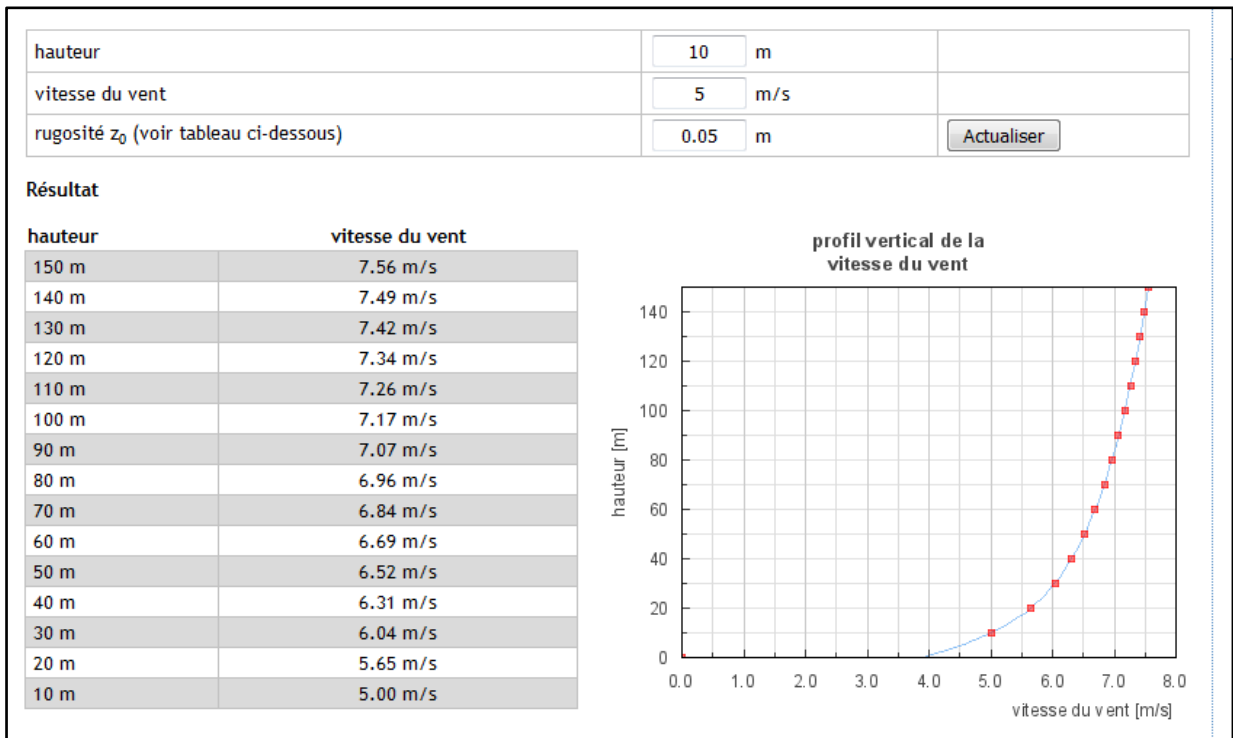


Figure 1 : exemple de profil de vent ( [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) )

## 6.2 Méthode de calcul

### 6.2.1 Introduction

Du fait des spécificités du bruit des éoliennes, les méthodes de calcul habituelles ne sont pas toujours adaptées et certains pays ont développé des méthodes de calcul spécifiques aux éoliennes.

La méthode générale de propagation du bruit reconnue au niveau international (ISO 9613-2 [6], cf. chapitre 6.2.2) possède certaines limites qui posent problème pour son application au bruit des éoliennes. En Suisse, l'OFEV recommande l'utilisation de la norme ISO 9613-2 avec certaines adaptations (cf. chapitre 6.2.3). D'autres méthodes de calcul sont encore décrites de manière succincte aux chapitres 6.2.4 à 6.2.7 ; excepté la méthode simplifiée suédoise (chapitre 6.2.4), elles sont similaires à la méthode ISO 9613-2.

La modélisation informatique a été réalisée avec le logiciel CadnaA de DataKustik (version 4.2). Le modèle de terrain 3D est constitué avec les courbes de niveau, la végétation, les emplacements de mesurages et les éoliennes en tant que sources ponctuelles de bruit.

### 6.2.2 ISO 9613-2

La norme ISO 9613-2 [6] prescrit une méthode générale pour le calcul de l'atténuation d'un son lors de la propagation en champ libre, elle prédit les niveaux de bruit ambiant à une distance donnée provenant de diverses sources.

La méthode tient compte des éléments suivants :

- des divergences géométriques
- de l'absorption atmosphérique
- de l'effet de sol
- des réflexions de surfaces
- de l'effet de la végétation
- de l'effet « de ville »
- de l'effet d'écran
- de l'influence des conditions météorologiques

Les équations de base sont les suivantes :

Niveau de pression acoustique équivalent par bande d'octave, au niveau d'un récepteur, calculé par bandes d'octaves de 63 Hz à 8 kHz, pour chaque source ponctuelle :

$$L_{fT} = L_w + D_c - A - C_{met} \quad (\text{éq.2})$$

Avec :

$L_w$  : niveau de puissance de la source ponctuelle

$D_c$  : correction de directivité (égal à =0 pour une source ponctuelle omnidirectionnelle en champ libre)

$A$  : atténuation par bande d'octave de la source ponctuelle au récepteur

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (\text{éq.3})$$

La divergence géométrique, pour une source ponctuelle, correspond à l'atténuation en champ libre de l'onde sphérique :

$$A_{div} = [20 \cdot \log(d/d_0) + 11] \quad (\text{éq.4})$$

Avec :  $d$  : distance entre la source et le récepteur (m)

$d_0$  : distance de référence (1 m)

La méthode complète de l'absorption atmosphérique est décrite dans l'ISO 9613-1 :1993 [7], mais la méthode simplifiée est la suivante :

$$A_{atm} = \alpha \cdot d / 1000 \quad (\text{éq.5})$$

Avec :  $\alpha$  : coefficient d'atténuation atmosphérique, en dB/m (cf. ISO 9613-1)

$d$  : distance entre la source et le récepteur (m)

L'effet sol se calcul par bande d'octave, en sommant les composantes d'atténuation pour les trois régions :

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad (\text{éq.6})$$

Avec :  $A_s$  : région de la source  
 $A_r$  : région du récepteur  
 $A_m$  : région intermédiaire

Dans le cas des éoliennes, comme la source de bruit est en hauteur (50 à 150 m au-dessus du sol), la méthode de calcul de l'effet sol ne serait pas applicable car cette géométrie sort des limites d'utilisation (la distance entre la source et le récepteur doit être plus grande que 30 x la hauteur cumulée « source + récepteur », voir Figure 1 de la norme ISO 9613-2).

Types d'atténuation supplémentaire :

$$A_{misc} = A_{fol} + A_{site} + A_{hous} \quad (\text{éq.7})$$

Avec :  $A_{fol}$  : atténuation due à la végétation  
 $A_{site}$  : atténuation en site industriel  
 $A_{hous}$  : atténuation par les habitations en milieu urbain

En plus, il faut aussi tenir compte d'une correction météorologique  $C_{met}$  qui dépend de la hauteur de la source et de la hauteur du récepteur soit :

$$\begin{aligned} \text{Si } d_p \leq 10 (h_s + h_r) & \quad \text{alors } C_{met} = 0 \\ \text{Si } d_p > 10 (h_s + h_r) & \quad \text{alors } C_{met} = C_0 [1 - 10 (h_s + h_r) / d_p] \end{aligned} \quad (\text{éq.8})$$

Avec  $d_p$  : distance entre la source et le récepteur projeté au sol

$h_s$  : hauteur de la source

$h_r$  : hauteur du récepteur

$C_0$  : facteur dépendant des statistiques météorologiques locales (vitesse et direction du vent, gradient de température) en dB

La précision estimée pour le bruit large bande  $L_{fT}(DW)$  calculé en utilisant les équations précédentes est la suivante :

Hauteur entre la source et le récepteur	Distance entre la source et le récepteur	
	0 < d < 100 m	100 m < d < 1000 m
0 < h < 5 m	± 3 dB	± 3 dB
5 m < h < 30 m	± 1 dB	± 3 dB

Tableau 2 : précision de la méthode de calcul ISO 9613-2

Dans le cas des éoliennes, ces équations impliquent les simplifications suivantes :

- la source sonore est considérée comme ponctuelle et omnidirectionnelle
- l'effet sol dépend principalement de la hauteur de la source
- pour la correction météo, comme la distance source-récepteur est inférieure à 10 x la hauteur cumulée, alors la correction  $C_{met}$  vaut 0

Malgré ces limites, de nombreux pays recommandent d'utiliser cette méthode pour calculer la propagation du bruit des éoliennes.

### 6.2.3 ISO 9613-2 (modifié EMPA)

En Suisse, la méthode recommandée par l'OFEV découle du rapport de l'EMPA « Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen » de 2010 [2]. Cette étude définit la méthode de calcul recommandée à son chapitre 7, en particulier :

- Méthode générale ISO 9613-2 calculée par bandes d'octave
- Chaque éolienne est modélisée par une source ponctuelle à la hauteur du moyeu avec une caractéristique omnidirectionnelle ( $D_c = 0$ ). Pour les positions de réception dans le plan du rotor, le niveau est de ce fait surestimé de 5 à 10 dB(A). Suite à l'orientation variable de l'axe du rotor, cette différence dans la caractéristique du rayonnement se répartit dans l'ensemble des directions

- Il est recommandé de désactiver l'effet de sol et de le remplacer par une correction (hausse du niveau acoustique) générale de +1 dB(A) pour les réflexions contre le sol
- Des conditions de propagation (trop) favorables sont modélisées en cas d'obstacles éventuels par l'utilisation de la correction météo Cmet. On peut normalement renoncer à la correction Cmet qui prend en considération l'occurrence de ces conditions favorables, étant donné que la période pertinente pour les valeurs limites est prioritairement la nuit avec des couches thermiques stables et qu'un vent contraire développe des zones d'ombre seulement à partir de 400 à 600 m
- En se fondant sur les indications de la norme et les critères susmentionnés, l'incertitude du calcul de propagation pour des distances jusqu'à 1000 m peut être estimée à -6/+3 dB(A). Cela signifie que la vraie valeur des immissions se situe, avec une probabilité de 67 %, dans l'intervalle de -6 à +3 dB(A) autour de la valeur calculée. Avec la prise en compte de l'incertitude des valeurs d'émission, on peut estimer une incertitude globale de -7 à +4 dB(A)

Ce dernier point est particulièrement important, car il confirme les incertitudes élevées dans le cas de pronostics du bruit des éoliennes.

### 6.2.4 Ljud fran vindkraftverk

Cette méthode (référence [8]) est la méthode utilisée par les Suédois et constitue un modèle simple spécifique aux éoliennes.

L'équation de base est la suivante :

Niveau de pression acoustique pour des distances entre la source et le récepteur inférieur à 1'000 m :

$$L_A = L_{WA,korr} - 8 - 20 \cdot \log(r) - 0,005 \cdot r \quad (\text{éq. 9})$$

Avec r : distance entre la source et le récepteur

Cette méthode est très simple et permet un calcul rapide sans avoir besoin de recourir à un modèle en 3D.

### 6.2.5 Nord 2000

Le modèle de propagation Nord 2000 [9] prédit le niveau de pression acoustique au récepteur en 1/3 d'octave de 25 Hz à 10 kHz. Le modèle de propagation est valide pour une source ponctuelle et les prédictions sont basées sur des niveaux de puissance en 1/3 d'octave.

Les équations de base sont les suivantes :

Le niveau de pression acoustique  $L_R$  au point récepteur est pour chaque fréquence prédit par l'équation suivante :

$$L_R = L_w + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r \quad (\text{éq. 10})$$

Avec  $L_w$  : niveau de puissance acoustique pour chaque bande de fréquence

$\Delta L_d$  : effet de propagation de la divergence géométrique de la source

$\Delta L_a$  : effet de propagation de l'absorption atmosphérique

$\Delta L_t$  : effet de propagation du terrain (sol et écran)

$\Delta L_s$  : effet de propagation de la zone de diffusion

$\Delta L_r$  : effet de propagation des dimensions d'obstacles et des propriétés de surface lors du calcul de son réfléchi par un obstacle

### 6.2.6 Cnossos-EU

Cette méthode (référence [10]) est le futur modèle de calcul européen (dans le but d'harmoniser les méthodes de calcul au niveau européen).

Les équations de base sont les suivantes :

Le niveau sonore au point récepteur avec des conditions favorables est le suivant :

$$L_f = L_{W,0,dir} - A_F \quad (\text{éq. 16})$$

Le terme  $A_F$  représente l'atténuation totale de la propagation dans des conditions favorables qui est calculé de la manière suivante :

$$A_F = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,F} \quad (\text{éq.17})$$

Avec  $A_{div}$  : l'atténuation de la divergence géométrique

$A_{atm}$  : l'atténuation de l'absorption atmosphérique

$A_{boundary,F}$  : l'atténuation due à la limite de milieu de propagation dans des conditions favorables avec les termes suivants :

$A_{ground,F}$  : effet sol pour des conditions favorables

$A_{dif,F}$  : atténuation de la diffraction dans les conditions favorables

Le niveau sonore au point récepteur avec des conditions homogènes est le suivant :

$$L_h = L_{W,0,dir} - A_H \quad (\text{éq. 18})$$

Le terme  $A_H$  représente l'atténuation totale de la propagation dans des conditions homogènes qui est calculé de la manière suivante :

$$A_H = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,H} \quad (\text{éq.19})$$

Avec  $A_{div}$  : l'atténuation de la divergence géométrique

$A_{atm}$  : l'atténuation de l'absorption atmosphérique

$A_{boundary,H}$  : l'atténuation due à la limite de milieu de propagation dans des conditions homogènes avec les termes suivants :

$A_{ground,H}$  : effet sol pour des conditions homogènes

$A_{dif,H}$  : atténuation de la diffraction dans les conditions homogènes

Le niveau global au point récepteur en tenant compte de l'occurrence des conditions favorables et homogènes est le suivant :

$$L_{LT} = 10 \cdot \log(p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}}) \quad (\text{éq. 20})$$

## 6.2.7 Harmonoise

Cette méthode européenne de calcul (voir [11] [12] [13] [14]) prend en compte les effets météorologiques (classe de stabilité, direction du vent...).

Les équations de base sont les suivantes :

Le niveau sonore au point récepteur est défini par l'équation suivante :

$$L = L_{source} + \Delta L_{prop} \quad (\text{éq. 23})$$

L'atténuation due à la propagation est définie par l'équation suivante :

$$\text{Avec } \Delta L_{prop} = \Delta L_{geo} + \Delta L_{air} + \Delta L_{excess} \quad (\text{éq. 24})$$

Dont  $\Delta L_{excess}$  : paramètre global tient compte des phénomènes suivants : réfraction atmosphérique, effet sol, effet d'écran

De plus, la méthode Harmonoise utilise des classes de stabilité qui sont les suivantes :

Classe de stabilité	Jour ou nuit	Couverture nuageuse (réparti sur 8 classes)
S1	Jour	0...2 / 8
S2	Jour	3...5 / 8
S3	Jour	6...8 / 8
S4	Nuit	5...8 / 8
S5	Nuit	0...4 / 8

Tableau 3 : classes de stabilité

### 6.3 Emplacements de mesurages

Les emplacements des 2 sites de mesurages ont été choisis de part et d'autre d'une éolienne en service à une distance d'environ 200 m dans le sens des vents dominants (Sud-Ouest, Nord-Est). Ces positions permettent de respecter les recommandations de la norme ISO 1996-2:2007 [4] (dans le sens des vents dominants) ainsi que de rester relativement éloigné des forêts et des autres éoliennes qui constituent des sources de bruit perturbatrices.

De plus, en choisissant une position relativement proche de l'éolienne (env. 200 m), on limite les incertitudes concernant la propagation sur de longues distances et on augmente l'émergence du bruit de l'éolienne étudiée par rapport au bruit de fond. Le choix de la distance d'environ 200 m de part et d'autre a aussi été dicté par des contraintes locales (limite de parcelle, présences d'arbres isolés).

Le site 1 de mesurages (à 200 mètres au Nord-Est de l'éolienne) est équipé avec un système d'acquisition Symphonie de 01 dB (bi-voie). Ce système enregistre le spectre en 1/3 d'octave et l'audio sur les 2 voies en format non compressé (\*.wav). L'échantillonnage des valeurs est de 20 ms. Sur le site 1, un enregistreur météo LEWL mesure la vitesse du vent et la direction à la hauteur de 9 m, ainsi que la vitesse uniquement à la hauteur de 4.5 m du sol avec un échantillonnage de 10 s. Une seconde station météo Reinhardt MWS 9-5 enregistre la vitesse du vent, la direction et la pluviométrie à 1.5 m du sol avec un échantillonnage de 10 min. Les stations météorologiques ont été placées à 1.5, 4.5 et 9 m de hauteur. Elles permettront de vérifier la pluviométrie et la vitesse du vent proche des microphones afin de respecter les recommandations de la norme ISO 1996-2:2007 [3] (vent  $\leq$  5m/s).

Le site 2 de mesurages (à 200 mètres au Sud-Ouest de l'éolienne) est équipé avec un sonomètre analyseur de fréquence Norsonic 140. Il enregistre le spectre en 1/3 d'octave avec un échantillonnage de 25 ms.

L'ensemble des appareils de mesurages est alimenté par un système autonome de batteries et de panneaux solaires. Les appareils sont connectés au réseau téléphonique (3G), ils peuvent donc être pilotés et contrôlés en permanence. Les différents appareils sonométriques (Symphonie 01 dB, Norsonic 140) sont homologués par le Metas et calibrés par une source étalon Brüel & Kjaer 4231 au début et à la fin des mesurages.

La campagne de mesurages a eu lieu du 12 mai 2015 au 12 juin 2015 ; les mesurages ont permis de couvrir des conditions météorologiques variées et représentatives de l'ensemble des conditions qui peuvent se rencontrer dans la région concernée.

Le passage régulier sur place (3 visites en plus de l'installation et démontage des appareils) ainsi que le suivi des appareils à distance (système de consultation à distance des données via le réseau de téléphonie mobile) ont permis de s'assurer que les mesurages ont eu lieu dans de bonnes conditions et sans interruption majeure.

Les données météorologiques sur ce site (statistiques pour les années 2011 à 2014) montrent que :

- Les vents dominants sont les suivants :
  - Vent du Sud-Ouest : environ 40% du temps
  - Vent du Nord-Est : environ 20% du temps
- Vitesse du vent :
  - La nuit, il y a davantage de vent que le jour
  - Env. 1/3 du temps, les éoliennes sont à l'arrêt ou fonctionnent au ralenti

## 7 Résultats

### 7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats des mesurages (chapitre 7.2) ainsi que les résultats des différentes méthodes de calcul (chapitre 7.3).

### 7.2 Mesurages

Nous avons dépouillé la campagne de mesure (sonomètres, stations météorologiques, données des éoliennes) et analysé ces données. Pendant la période de mesure, aucune perturbation importante n'a été constatée ni au niveau de l'exploitation des éoliennes, ni en ce qui concerne les différents appareillages de mesurages.

#### 7.2.1 Données météorologiques

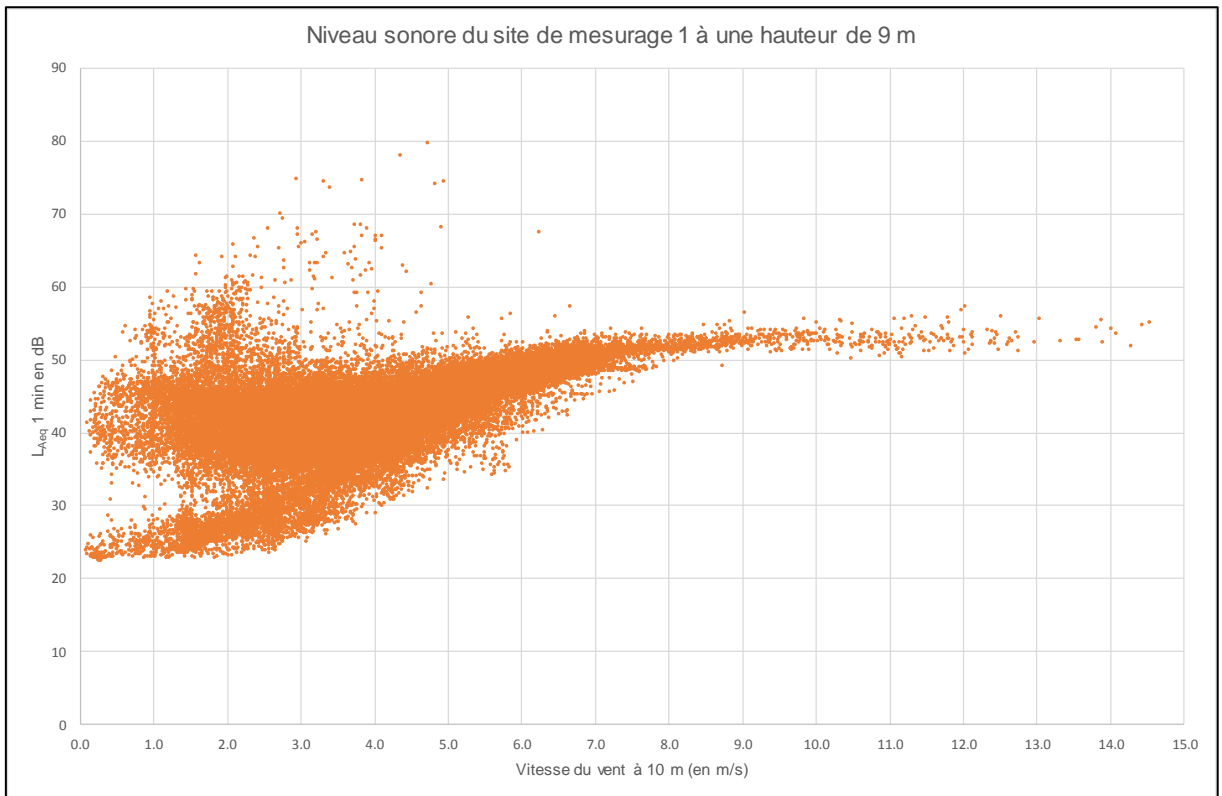
Lors des mesurages de la vitesse du vent, nous n'avons constaté qu'une très faible apparition de vent à plus de 5 m/s (moins de 1% du temps) au niveau des microphones (proche du sol). Aucune correction par rapport au bruit du vent dans le microphone n'est donc nécessaire pour ce projet de recherche du fait que les niveaux sonores mesurés avec ces vitesses de vent (~5 m/s) dépassent 50 dB(A), soit 10 dB(A) de plus que le bruit généré potentiellement par le vent dans le micro (voir chapitre 6.1.1.1). Par contre, seules les périodes avec un vent supérieur à 5 m/s seront supprimées de l'échantillonnage.

En comparaison avec les statistiques météorologiques de longue durée (chapitre 6.3), il apparaît que :

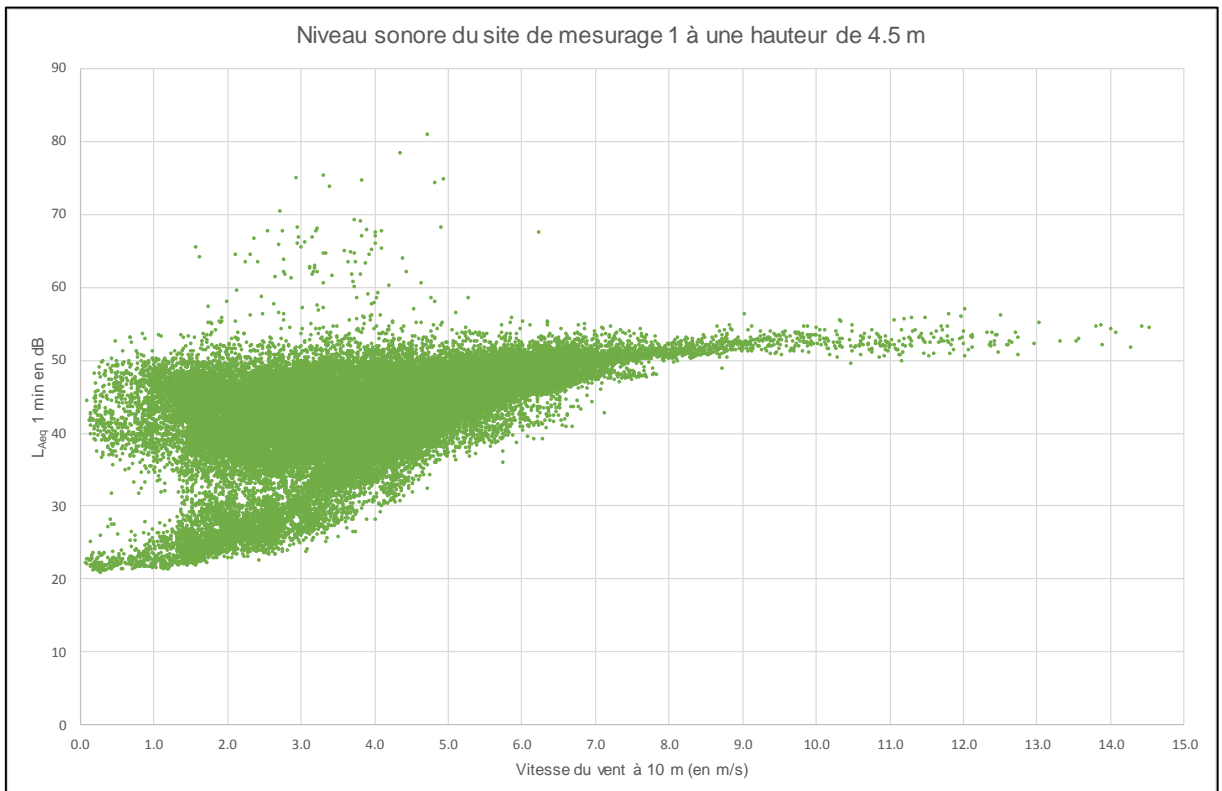
- Les 2 directions principales du vent (Nord-Est, Sud-Ouest) sont bien présentes pendant la campagne de mesure
- Le vent du Sud-ouest est le vent dominant (le plus fréquent)
- Pendant la période de mesure, le vent du Sud-Ouest (191° à 259°) est sous-représenté soit 28% du temps au lieu de 40% annuellement
- Pendant la période de mesure, le vent du Nord-Est (34° à 101°) est légèrement surreprésenté soit 22% du temps au lieu de 20% annuellement

#### 7.2.2 Mesurages des niveaux sonores

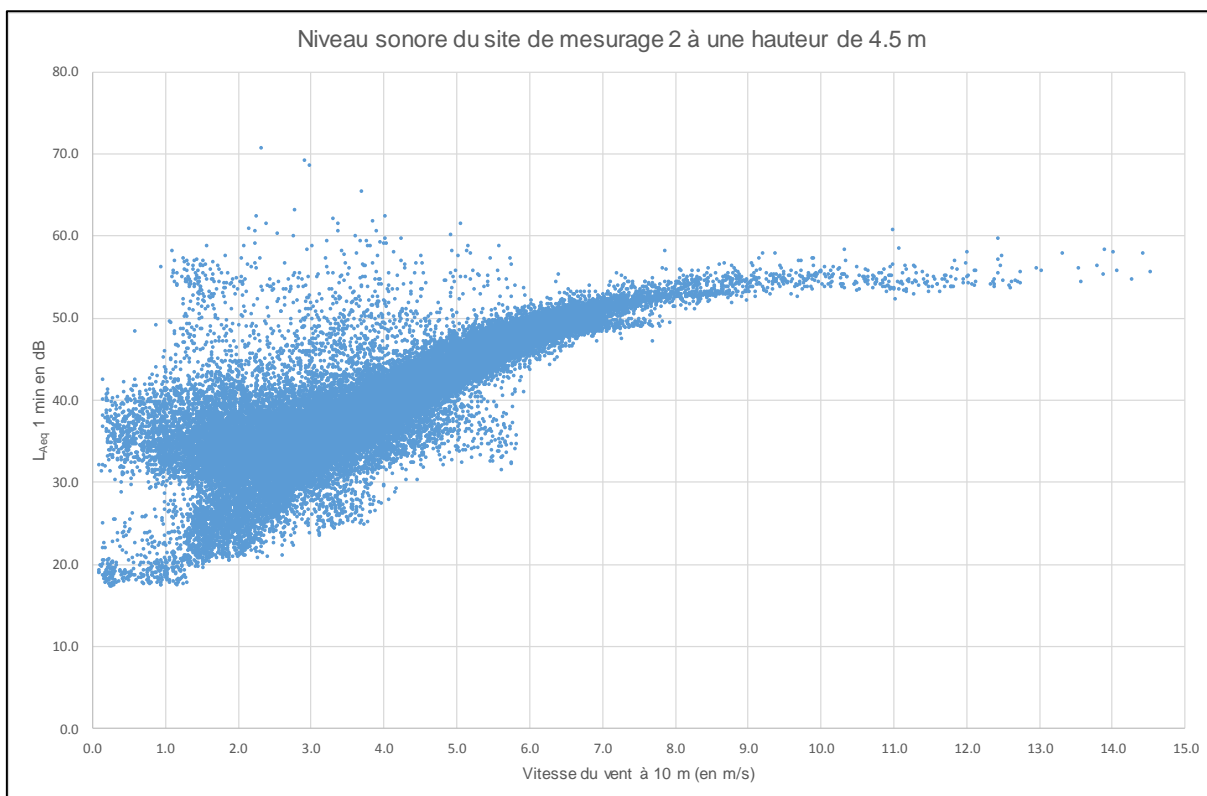
Les graphiques suivants (graphiques 5, 6 et 7) représentent les niveaux sonores mesurés aux 3 positions de microphones. Il s'agit de l'ensemble des valeurs (données brutes) par intervalles de 1 minute excepté les périodes avec arrêt des appareils (maintenance...) représentant moins de 1% du temps.



Graphique 5 : Niveau sonore du site 1 (9m) –  $L_{Aeq} 1 \text{ min}$



Graphique 6 : Niveau sonore du site 1 (4.5 m) –  $L_{Aeq} 1 \text{ min}$



Graphique 7 : Niveau sonore site 2 (4.5 m) –  $L_{Aeq}$  1 min

### 7.2.3 Bruits perturbateurs

Les enregistrements des niveaux sonores tiennent compte de tous les événements sonores qui se sont produits à proximité des micros ; il est donc nécessaire de supprimer tout d'abord les échantillons avec des bruits perturbateurs. Il s'agit en particulier des périodes avec :

- Une météo défavorable : pluie, rafale de vent dans les micros...
- Des chantiers aux alentours, des activités humaines...
- Des activités agricoles : cloche des vaches, tracteur, travaux forestiers...
- Bruit de la nature : oiseaux, grillons...

Cette suppression se fait à l'aide des données météorologiques (pluie, rafales de vent) ainsi que sur la base de l'écoute des enregistrements audio.

### 7.2.4 Validation des données

Après la suppression des périodes avec des bruits perturbateurs, une vérification de la fiabilité des données a été effectuée ; cette vérification s'est faite par :

- Comparaison entre les valeurs fournies par les 2 systèmes d'enregistrement (à une hauteur de 9 mètres et à une hauteur de 4,5 mètres),
- Ecoute des enregistrements audio afin de vérifier la présence ou l'absence du bruit des éoliennes.
- Suite à ces étapes de suppression des bruits perturbateurs et de validation, nous avons décidé **de garder exclusivement les niveaux sonores de nuit de 22h00 à 4h00 pour la suite de ce projet de recherche**. En effet, la présence des bruits perturbateurs se limite principalement à la période de jour y compris l'aube et la tombée de la nuit, soit de 4h00 à 22h00 à cette période de l'année.

### 7.2.5 Regroupement par phase de vent

Les données météorologiques au niveau des éoliennes (statistique 2011-2014) montrent que dans ce secteur les vents dominants sont essentiellement représentés par :

- Vent du Sud-Ouest (orientation de 191° à 281°) : env. 40 % du temps
- Vent du Nord-Est (orientation de 31° à 101°) : env. 20 % du temps

L'analyse des mesurages se fera donc prioritairement selon ces 2 secteurs de vent. Les autres directions de vent rencontrées sur ce site représentent des phases relativement peu fréquentes qui ne seront pas étudiées plus en détail dans ce projet.

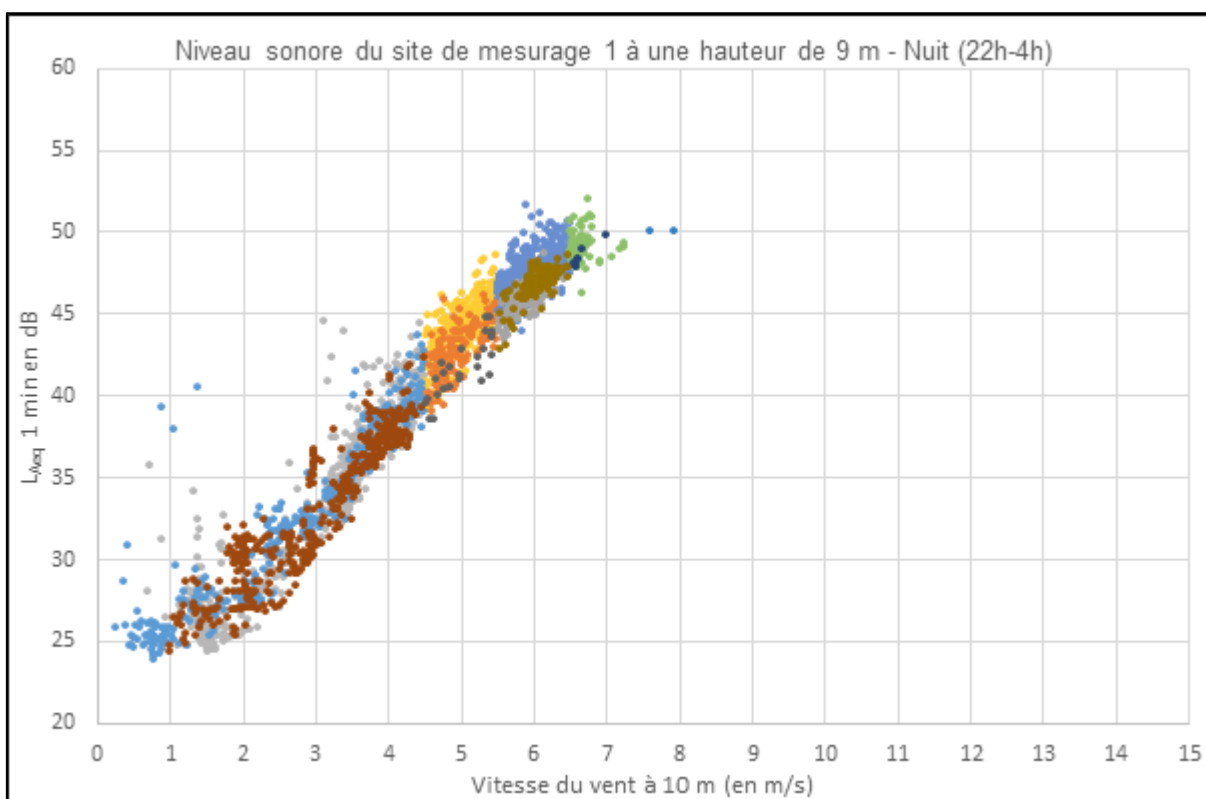
Nous avons également regroupé les données par classes de vent de 1 m/s (selon le projet de norme NFS 31-114 [5]) comparable directement aux données des constructeurs (cf. tableau 4).

Eolienne E3	Classe de vent						
	≤ 4.5	4.5 <...≤ 5.5	5.5 <...≤ 6.5	6.5 <...≤ 7.5	7.5 <...≤ 8.5	8.5 <...≤ 9.5	> 9.5
Occurrence jour (en %)	42.9	11.4	9.3	8.2	7	6.1	15.1
Occurrence nuit (en %)	31	10.9	10.8	10.1	8.7	8.1	20.4

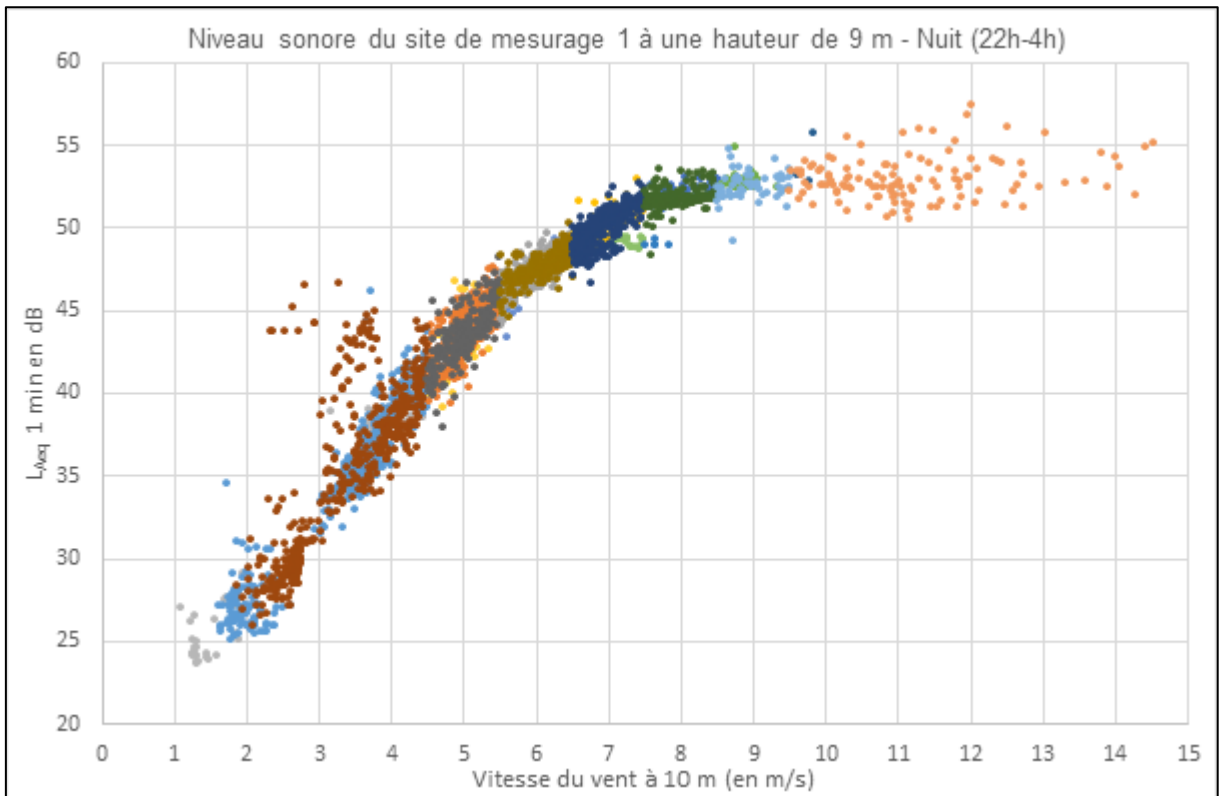
Tableau 4 : classes de vent

### 7.2.6 Niveaux sonores globaux

Après avoir supprimé les bruits perturbateurs et sélectionné la période de nuit de 22h00 à 4h00, nous avons obtenu les niveaux sonores des différents sites selon les différentes directions de vent. Les graphiques 8 et 9 représentent pour le site 1 (hauteur 9 m), le niveau  $L_{Aeq}$  (1 min) en fonction de la vitesse du vent à 10 m (les différentes couleurs correspondent aux secteurs de direction du vent). Il s'agit des niveaux sonores globaux intégrant le bruit des éoliennes ainsi que les bruits de fond qui n'ont pas pu être supprimés (en particulier le bruit du vent dans la végétation).

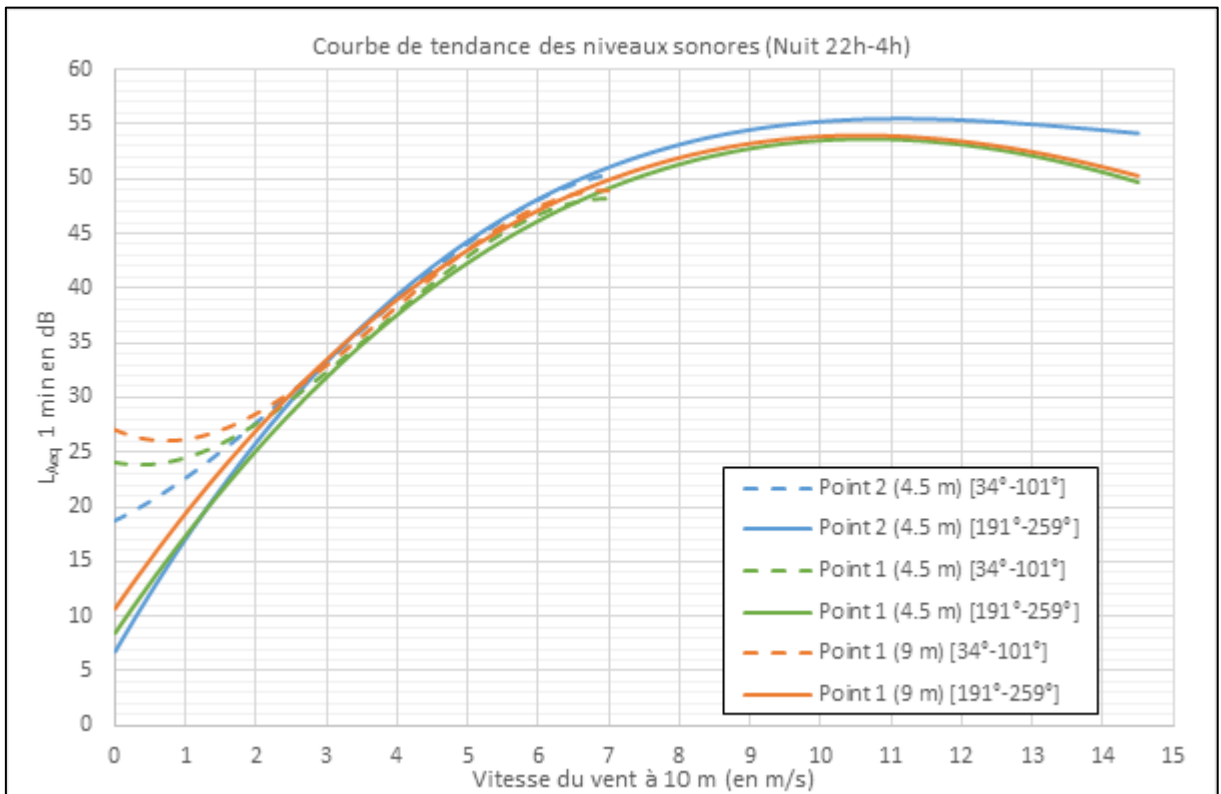


Graphique 8 : Niveau sonore  $L_{Aeq}$  du point 1 (9 m) avec la direction ( $34^\circ$  à  $101^\circ$ )



Graphique 9 : Niveau sonore  $L_{Aeq}$  du point 1 (9 m) avec la direction ( $191^\circ$  à  $259^\circ$ )

A partir de des valeurs des différents sites de mesurages, nous avons déterminé les courbes de tendance correspondantes (voir graphique 10).



Graphique 10 : Courbe de tendance polynomiale d'ordre 3

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 2 (4.5 m) de 34 à 101° :

$$y = -0.0945x^3 + 0.864x^2 + 3.0935x + 18.768$$
$$R^2 = 0.9663$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (4.5 m) de 34 à 101° :

$$y = -0.1677x^3 + 1.8534x^2 - 1.2962x + 24.009$$
$$R^2 = 0.9606$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (9 m) de 34 à 101° :

$$y = -0.1896x^3 + 2.192x^2 - 2.9203x + 27.002$$
$$R^2 = 0.964$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 2 (4.5 m) de 191 à 259° :

$$y = 0.0191x^3 - 0.8184x^2 + 11.12x + 6.7765$$
$$R^2 = 0.9605$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (4.5 m) de 191 à 259° :

$$y = 0.0089x^3 - 0.5871x^2 + 9.4839x + 8.4723$$
$$R^2 = 0.9605$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (9 m) de 191 à 259° :

$$y = 0.01x^3 - 0.5979x^2 + 9.2945x + 10.722$$
$$R^2 = 0.9515$$

Lors de l'établissement d'une équation de régression, le coefficient de détermination (R<sup>2</sup> variable entre 0 et 1) détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points. Si le R<sup>2</sup> est proche de 0, cela signifie que l'équation de la droite de régression n'est pas corrélée avec la distribution des points. Si le R<sup>2</sup> est proche de 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est bien corrélée avec la distribution des points.

Cela se traduit de manière graphique selon la relation suivante : plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R<sup>2</sup> tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression.

Pour les 3 points et les 2 directions principales de vent, on remarque que le coefficient de détermination R<sup>2</sup> est très proche de 1 ce qui traduit une bonne corrélation entre la courbe de tendance et le nuage de points.

Sur la base de ces courbes de corrélation, il est possible de calculer les niveaux sonores  $L_{Aeq}$  pour chaque classe de vent (voir tableaux 5 et 6). A partir de ces valeurs, le niveau sonore moyen annuel a été déterminé à partir de l'occurrence des différentes classes de vent (pour le jour et pour la nuit).

Vitesse du vent	Occurrence % Jour	Point 1 (4.5 m) [191°-259°]		Point 1 (9 m) [191°-259°]		Point 2 (4.5 m) [191°-259°]	
		$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence
<4.5	42.9	--	--	--	--	--	--
4.5-5.5	11.4	42	33	43	34	44	35
5.5-6.5	9.3	46	36	48	37	48	38
6.5-7.5	8.2	49	38	50	39	51	40
7.5-8.5	7.0	51	40	52	40	53	42
8.5-9.5	6.1	53	41	53	41	54	42
>9.5	15.1	54	45	54	46	55	47
Total	100		48		49		50

Tableau 5 : niveau sonore moyen  $L_{Aeq}$  de jour

Vitesse du vent	Occurrence % Nuit	Point 1 (4.5 m) [191°-259°]		Point 1 (9 m) [191°-259°]		Point 2 (4.5 m) [191°-259°]	
		$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence
<4.5	31.0	--	--	--	--	--	--
4.5-5.5	10.9	42	33	43	34	44	35
5.5-6.5	10.8	46	37	48	37	48	38
6.5-7.5	10.1	49	39	50	40	51	41
7.5-8.5	8.7	51	41	52	41	53	43
8.5-9.5	8.1	53	42	53	42	54	44
>9.5	20.4	54	47	54	47	55	48
Total	100		49		50		51

Tableau 6 : niveau sonore moyen  $L_{Aeq}$  de nuit

L'occurrence du vent montre que le vent est en général plus fort la nuit que le jour (les niveaux sonores de nuit sont plus élevés de 1 dB(A)). Le niveau sonore annuel du point 2 (hauteur de 4.5 m) est plus élevé de 2 dB(A) par rapport au point 1 (4.5 m). Le niveau sonore annuel du point 1 (9 m) est plus élevé de 1 dB(A) que le niveau au même point à une hauteur de 4.5 m pour les niveaux  $L_{Aeq}$ .

#### Commentaires sur les niveaux sonores globaux :

- Les valeurs obtenues pour les 3 positions de mesurages sont très proches ( $\pm 1$  dB(A)) pour le domaine de vent avec le bruit des éoliennes ( $v > 4.5$  m/s)
- Pour  $v > 4.5$  m/s, le point 2 est légèrement plus élevé que les points 1(9 m) et 1(4.5 m), cela peut s'expliquer par l'influence du bruit provenant d'une autre éolienne (distance d'environ 500 m)
- Le niveau sonore au point 1 (hauteur 4.5 m) est légèrement moins élevé que le point 1 (hauteur 9 m), cela peut s'expliquer par le fait que le point à 9 m est soumis à des vitesses de vent plus élevées
- Pour les périodes avec un vent faible ( $v < 4.5$  m/s), le bruit de l'éolienne est négligeable et les valeurs mesurées dépendent uniquement des bruits ambiants qui peuvent fortement varier
- Les différences de niveaux sonores entre vents portants et vents contraires sont dans notre cas très faibles ( $\pm 1$  dB(A))
- En tenant compte de la fréquence des différentes phases de vent, la période avec les vents les plus forts ( $v > 9.5$  m/s avec 15.1% de jour et 20.4% de nuit) représente près de 50% de la dose de bruit de jour comme de nuit.
- De nuit, le niveau sonore global est de 1 dB(A) plus élevé

## 7.2.7 Bruit des éoliennes

Afin de déterminer le bruit des éoliennes (sans les bruits de fond), plusieurs approches sont possibles :

- Déterminer les périodes où le bruit des éoliennes est particulièrement audible et considérer que ces périodes sont représentatives du bruit des éoliennes
- Utiliser un indicateur permettant d'extraire le bruit de fond ( $L_{90}$ ,  $L_{95}$ ,  $L_{50}$ ...)
- Déterminer le bruit des éoliennes à partir d'une analyse spectrale
- Déterminer le bruit de fond par mesure (éolienne arrêtée)

### 7.2.7.1 Périodes représentatives

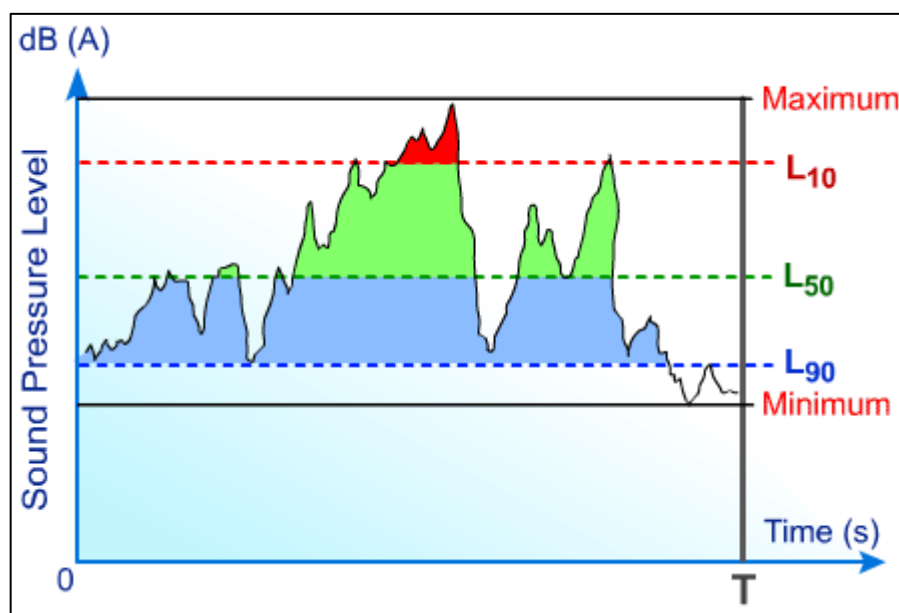
La méthode la plus simple pour déterminer le bruit des éoliennes (sans le bruit de fond) serait de trouver une ou des périodes pendant lesquelles le bruit des éoliennes serait particulièrement marqué (nettement émergent) alors que le bruit de fond (bruit du vent) resterait relativement faible. L'écoute des enregistrements audio montre que le bruit de l'éolienne est le plus souvent présent (audible) lorsque la vitesse du vent est élevée. Toutefois, contrairement aux recommandations de l'OFEV [1], l'audibilité du bruit des éoliennes sur ces sites de mesurages est relativement faible de même que les composantes tonales et impulsives, ainsi que les phénomènes de modulation d'amplitude.

L'analyse de différentes périodes montre que le bruit du vent au niveau des micros est toujours important lorsque les éoliennes fonctionnent avec un régime élevé. Les seules périodes où le bruit du vent est limité correspondent évidemment aux périodes avec un faible vent et donc aussi aux périodes où l'éolienne est arrêtée ou fonctionne avec une puissance relativement faible et donc des émissions sonores réduites.

Il n'a donc pas été possible de trouver des périodes qui n'étaient pas perturbées par le bruit de fond et qui seraient directement représentatives du bruit des éoliennes.

### 7.2.7.2 Analyse statistique

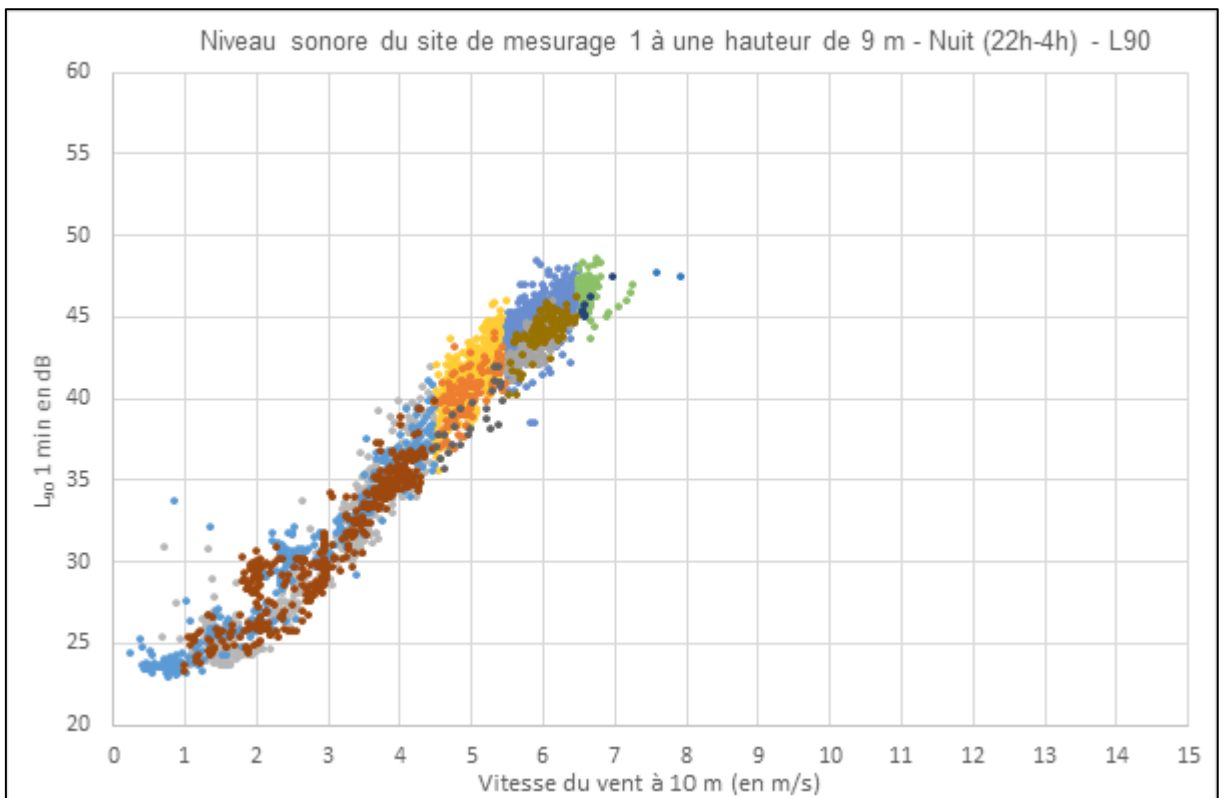
Certains indices statistiques permettent de déterminer le bruit de fond ou d'extraire le bruit à documenter. Dans le cas du bruit des éoliennes, l'indice  $L_{90}$  est parfois utilisé pour mieux qualifier le bruit des éoliennes (par exemple les méthodes recommandées en Angleterre, Nouvelle-Zélande et Australie).



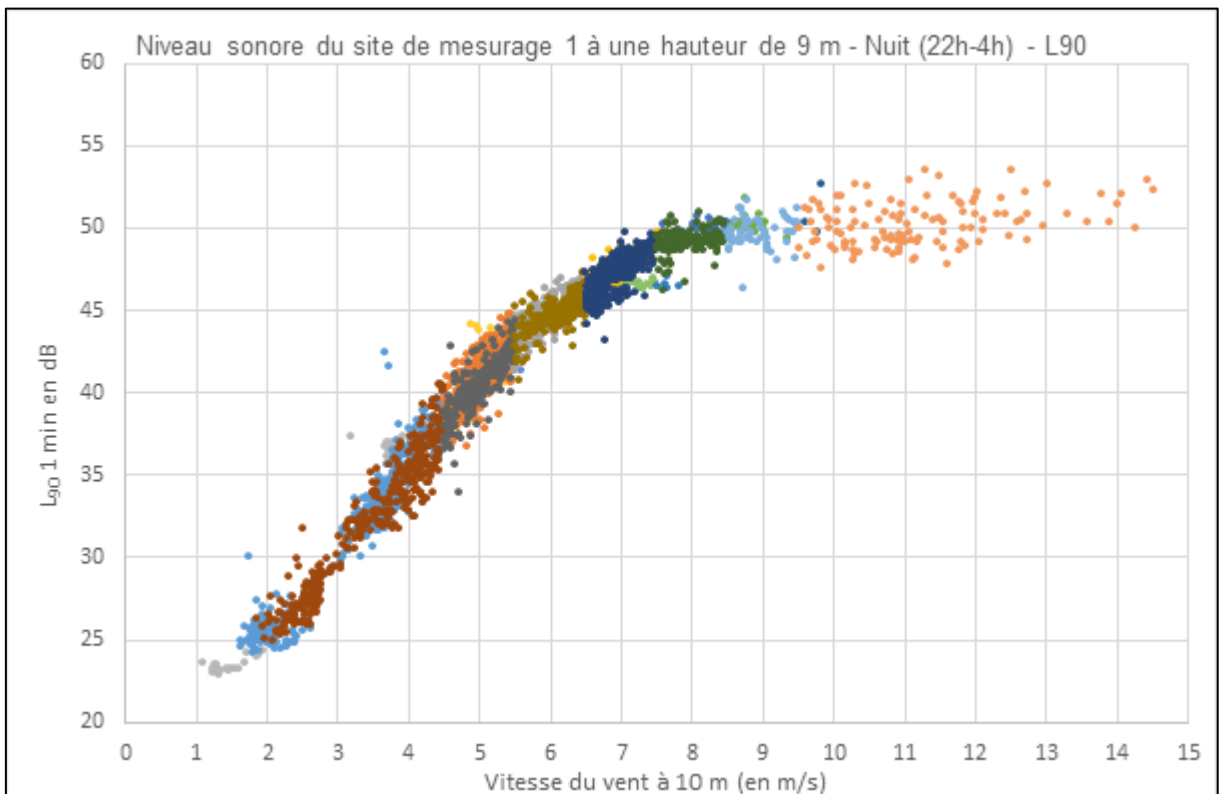
Graphique 11 : indices statistiques

Le niveau  $L_{90}$  est le niveau en dB dépassé pendant 90% du temps (cf. graphique ci-dessus).

Les graphiques 12 et 13 montrent, pour le site 1 (hauteur 9 m), l'indice  $L_{90}$  pour chaque intervalle de 1 min en fonction de la vitesse du vent à 10 m.

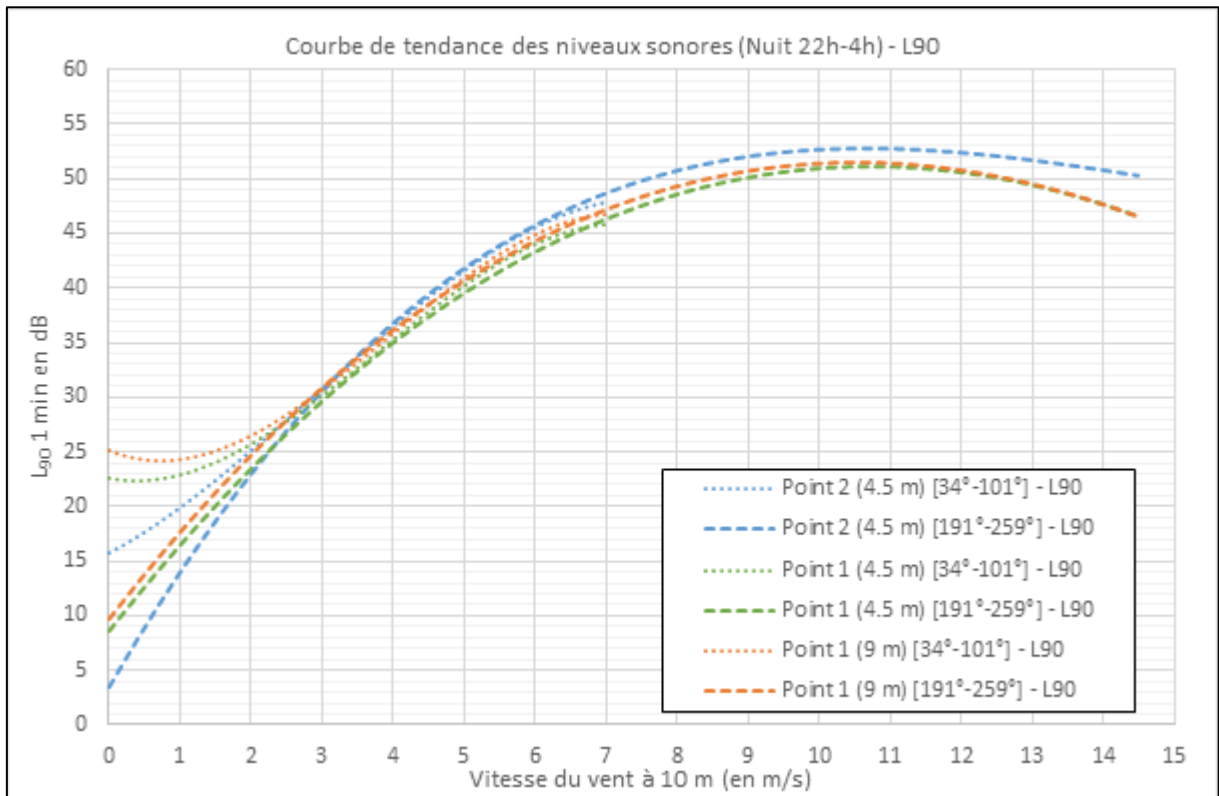


Graphique 12 : Niveau sonore  $L_{90}$  du point 1 (9 m) avec la direction (34° à 101°)



Graphique 13 : Niveau sonore  $L_{90}$  du point 1 (9 m) avec la direction (191° à 259°)

Le graphique 14 montre les courbes de corrélation pour l'indice L<sub>90</sub> et pour les différents sites de mesurages.



Graphique 14 : Courbe de tendance polynomiale d'ordre 3

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 2 (4.5 m) de 34 à 101° :

$$y = -0.0904x^3 + 0.795x^2 + 3.4468x + 15.787$$

$$R^2 = 0.9701$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (4.5 m) de 34 à 101° :

$$y = -0.1509x^3 + 1.71x^2 - 1.2466x + 22.555$$

$$R^2 = 0.9674$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (9 m) de 34 à 101° :

$$y = -0.1709x^3 + 2.0177x^2 - 2.6709x + 25.207$$

$$R^2 = 0.9691$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 2 (4.5 m) de 191 à 259° :

$$y = 0.0183x^3 - 0.8246x^2 + 11.343x + 3.3915$$

$$R^2 = 0.9746$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (4.5 m) de 191 à 259° :

$$y = 0.0032x^3 - 0.4376x^2 + 8.2867x + 8.6008$$

$$R^2 = 0.9614$$

Equation de la courbe de tendance et coefficient de détermination R<sup>2</sup> du point 1 (9 m) de 191 à 259° :

$$y = 0.0043x^3 - 0.468x^2 + 8.4244x + 9.644$$

$$R^2 = 0.9716$$

On remarque que le coefficient de détermination  $R^2$  est très proche de 1 ce qui traduit une bonne corrélation entre la courbe de tendance et le nuage de points.

Sur la base de ces courbes de corrélation, il est possible de calculer les niveaux sonores  $L_{90}$  pour chaque classe de vent (voir tableaux 7 et 8). A partir de ces valeurs, il est possible de calculer le niveau sonore moyen annuel en connaissant l'occurrence des différentes classes de vent.

Vitesse du vent	Occurrence % Jour	Point 1 (4.5 m) [191°-259°]		Point 1 (9 m) [191°-259°]		Point 2 (4.5 m) [191°-259°]	
		$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence
<4.5	42.9	--	--	--	--	--	--
4.5-5.5	11.4	39	30	39	31	39	32
5.5-6.5	9.3	43	33	43	34	43	35
6.5-7.5	8.2	46	35	46	36	46	38
7.5-8.5	7.0	49	37	49	38	49	39
8.5-9.5	6.1	50	38	50	39	50	40
>9.5	15.1	51	43	51	43	51	44
Total	100		46		46		48

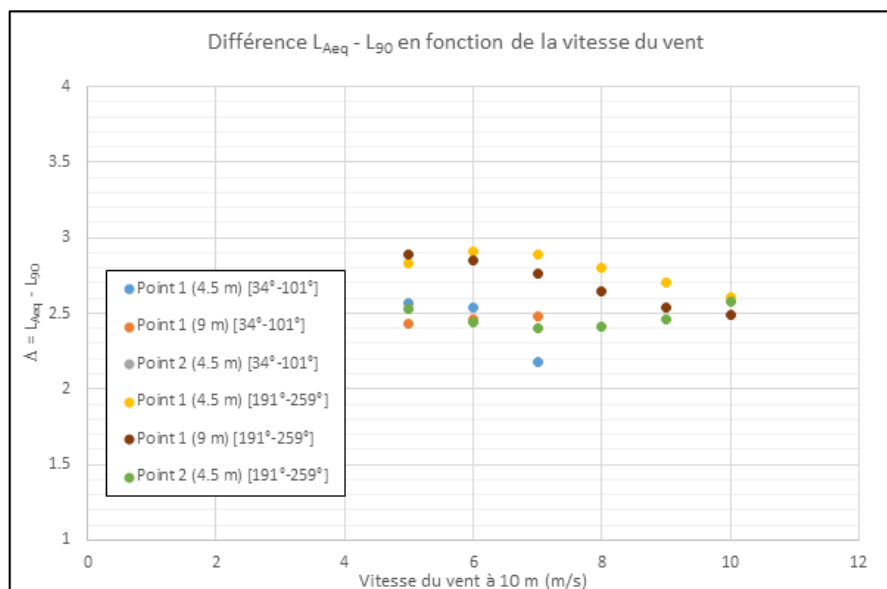
Tableau 7 : niveau sonore  $L_{90}$  de jour

Vitesse du vent	Occurrence % Nuit	Point 1 (4.5 m) [191°-259°]		Point 1 (9 m) [191°-259°]		Point 2 (4.5 m) [191°-259°]	
		$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence	$L_{Aeq}$	Pondéré /occurrence
<4.5	31.0	--	--	--	--	--	--
4.5-5.5	10.9	39	30	39	31	39	32
5.5-6.5	10.8	43	34	43	35	43	36
6.5-7.5	10.1	46	36	46	37	46	39
7.5-8.5	8.7	49	38	49	39	49	40
8.5-9.5	8.1	50	39	50	40	50	41
>9.5	20.4	51	44	51	44	51	46
Total	100		47		47		49

Tableau 8 : niveau sonore  $L_{90}$  de nuit

En comparant les résultats obtenus (entre les paramètres  $L_{90}$  et  $L_{Aeq}$ ), nous pouvons en déduire la relation suivante entre  $L_{90}$  et  $L_{Aeq}$  (voir graphique 15):

$$L_{90} = L_{Aeq} - 2.5 \pm 0.5 \text{ dB(A)}$$



Graphique 15 : Différence des niveaux sonores  $L_{Aeq} - L_{90}$  en fonction du vent

L'utilisation de l'indicateur  $L_{90}$  permet de déduire une partie des bruits perturbateurs. La valeur moyenne  $L_{90}$  est 2 à 3 dB inférieure à la valeur  $L_{Aeq}$ .

**Toutefois, dans le cas présent l'utilisation de l'indicateur  $L_{90}$  ne semble pas pertinent. En effet, l'écoute audio des périodes avec un niveau sonore faible (périodes prises en compte dans le  $L_{90}$ ) n'a pas permis de mettre en évidence une émergence significative du bruit des éoliennes dans ces moments. L'utilisation de l'indice  $L_{90}$  surestimerait probablement le bruit des éoliennes.**

### 7.2.7.3 Analyse spectrale

L'analyse spectrale effectuée sur les données n'a pas permis de mettre en évidence le bruit des éoliennes. A ce stade, cette analyse s'est limitée aux procédés usuels, c'est-à-dire à l'analyse des données par tiers d'octave. Cette analyse a été effectuée sur plusieurs périodes où le bruit de l'éolienne était audible sans toutefois arriver à mettre en évidence des fréquences (tiers d'octaves) spécifique au bruit des éoliennes.

Les données audio récoltées pourraient servir à une analyse fréquentielle plus poussées, par exemple en bande fine (FFT, sonogramme). Cette méthode pourrait permettre de mettre en évidence des raies spectrales fines spécifiques au bruit des éoliennes (par exemple 130 Hz comme mentionné dans les données techniques, voir chapitre 6.3.2).

### 7.2.7.4 Détermination du bruit de fond

Une autre manière de connaître le bruit des éoliennes sans le bruit de fond serait de déterminer plus précisément le bruit de fond. Pour cela, une campagne de mesurages complémentaires serait nécessaire sur les mêmes sites avec des périodes à fort vent et avec l'éolienne arrêtée (mesurages « stop and go », avec alternance rapprochée). Cette méthode plus précise est recommandée dans la norme IEC 61400-11 [16] et dans le projet de norme NFS 31-114 [5].

## 7.2.8 Conclusion sur les mesurages

La méthode proposée a permis de valider un certain nombre d'éléments concernant :

- Le matériel et l'instrumentation (boule antivent),
- La durée nécessaire pour couvrir les différentes conditions météorologiques (1 mois),
- Les différents paramètres à documenter (niveau sonore, vitesse du vent ...),
- Les périodes utilisables (de nuit entre 22h00 et 04h00),
- Le choix des emplacements de mesurages.

Par contre, il n'y a pas été possible de déterminer précisément le bruit des éoliennes par rapport aux bruits de fond. Les bruits de fond (principalement le bruit du vent dans la végétation) sont relativement élevés sur ce site du fait de la proximité de la forêt et de la situation très exposée au vent (sur la crête).

Dans cette configuration et même en tenant compte de la faible distance entre avec les éoliennes (environ 200 mètres), les niveaux sonores mesurés représentent le bruit de l'éolienne mélangé aux bruits de fond, même après suppression d'une grande partie des bruits perturbateurs. L'audibilité du bruit des éoliennes sur ces sites de mesurages est relativement faible de même que les composantes tonales et impulsives, ainsi que les phénomènes de modulation d'amplitude qui n'ont pas pu être mis en évidence.

Les différentes méthodes testées (choix de périodes avec une audibilité marquée du bruit des éoliennes, analyse des niveaux sonores par tiers d'octave, analyse statistique  $L_{90}$ ) n'ont pas permis de déterminer précisément le bruit des éoliennes.

Pour définir plus précisément le bruit des éoliennes, des investigations complémentaires devraient être entreprises, par exemple :

- Analyse en bande fine (FFT) des enregistrements audio
- Mesurages complémentaires avec arrêt de l'éolienne

## 7.3 Méthodes de calcul

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des calculs pour déterminer les niveaux de bruit aux emplacements des mesurages selon différentes méthodes. Les émissions sonores des éoliennes ont été définies selon les données techniques des fabricants (puissance acoustique  $L_w$  en dB(A) par tiers d'octave).

### 7.3.1 ISO 9613-2

Le tableau 9 résume les résultats obtenus avec la méthode ISO 9613-2 aux trois emplacements des mesurages avec différentes phases de vent. En plus, nous avons décidé de faire varier le coefficient d'absorption du sol  $G$  (0 / 0.5 / 1) afin de constater l'influence de ce paramètre.

ISO 9613-2 (G=0)			
Vitesse du vent en m/s	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	40.7	40.8	41.3
5.5-6.5	44.9	45	45.5
6.5-7.5	46.8	46.9	47.4
7.5-8.5	47.5	47.6	48.1
8.5-9.5	47.6	47.7	48.2
>9.5	47.2	47.3	47.8

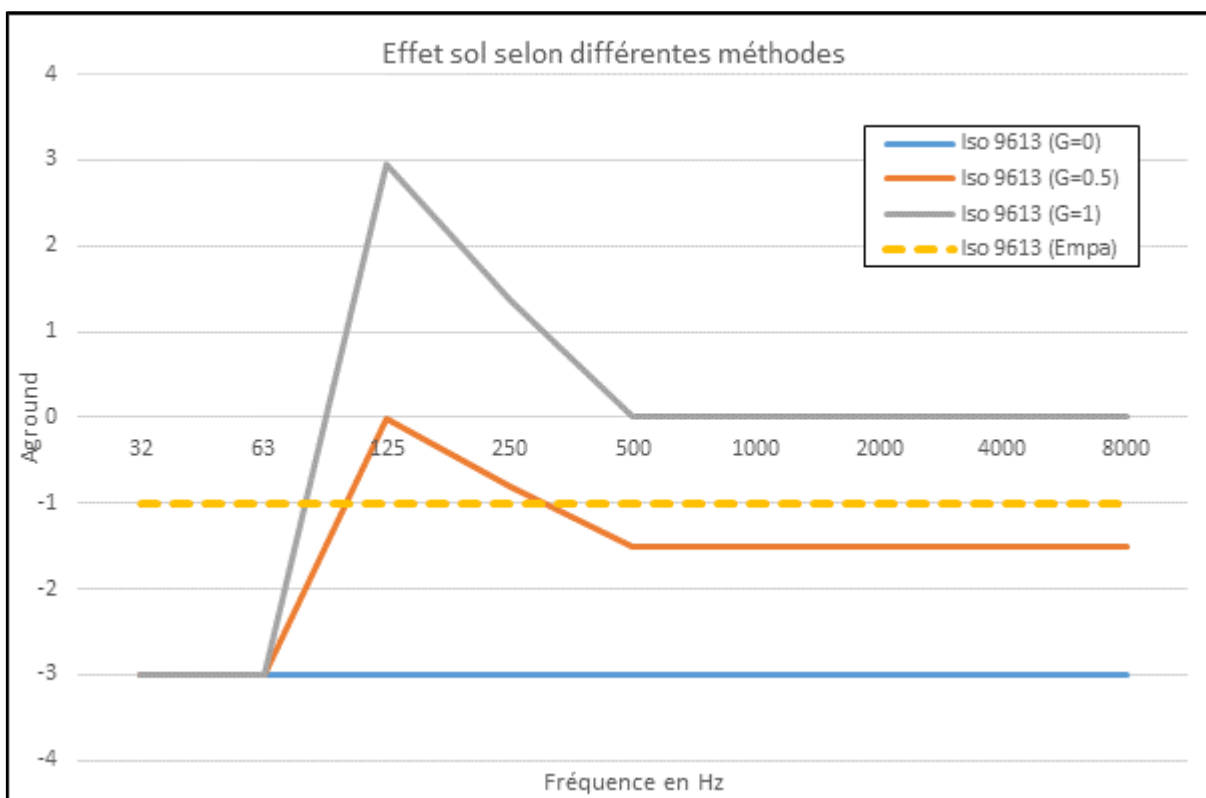
ISO 9613-2 (G=0.5)			
Vitesse du vent en m/s	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	39	39.3	39.6
5.5-6.5	43.1	43.5	43.8
6.5-7.5	45	45.4	45.7
7.5-8.5	45.7	46.1	46.4
8.5-9.5	45.8	46.2	46.5
>9.5	45.5	45.8	46.1

ISO 9613-2 (G=1)			
Vitesse du vent en m/s	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	37.3	37.9	37.9
5.5-6.5	41.5	42	42.1
6.5-7.5	43.4	43.9	44
7.5-8.5	44.1	44.6	44.7
8.5-9.5	44.2	44.7	44.8
>9.5	43.8	44.4	44.4

Tableau 9 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode ISO 9613-2

Le graphique 16 représente l'effet sol en fonction de la fréquence (selon différents coefficients d'absorption).



Graphique 16 : effet sol avec variation du coefficient d'absorption

Selon la directive européenne 2015/996 « établissant des méthodes communes d'évaluation du bruit conformément à la directive 2002/49/CE » du parlement européen et du conseil [15], les propriétés d'absorption acoustique du sol sont principalement liées à sa porosité. Un sol compact est généralement réfléchissant, alors qu'un sol poreux est absorbant.

Pour des besoins de calcul, l'absorption acoustique d'un sol est représentée par un coefficient sans dimension G (entre 0 et 1). Le tableau 10 donne les valeurs du paramètre G pour différents types de sol à l'extérieur.

Description	Type	Porosité (kPa·s/m <sup>2</sup> )	Valeur G
Très absorbant (comme de la neige ou de la mousse)	A	12,5	1
Sol forestier absorbant (comme de la bruyère dense et courte ou de la mousse épaisse)	B	31,5	1
Sol non tassé, meuble (tourbe, herbe, terre meuble)	C	80	1
Sol non tassé normal (couvertures mortes, pâturage)	D	200	1
Champ tassé et gravier (pelouses tassées, parc)	E	500	0,7
Sol dense tassé (route en gravier, parking)	F	2 000	0,3
Surfaces dures (asphalte, béton les plus courants)	G	20 000	0
Surfaces très dures et/ou denses (asphalte dense, béton, eau)	H	200 000	0

Tableau 10 : valeurs G pour différents types de sol

**Nous avons donc considéré pour la suite des calculs un coefficient d'absorption du sol G=1 (absorbant) correspondant au site étudié compris entre le type C à D (herbe, pâturage).**

### 7.3.2 ISO 9613-2 (modifié EMPA)

Le tableau 11 résume les résultats obtenus selon les recommandations de l'EMPA aux emplacements des mesurages avec différentes phases de vent.

Vitesse du vent en m/s	ISO 9613-2 (selon EMPA)		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	38.6	38.7	39.3
5.5-6.5	42.8	42.8	43.5
6.5-7.5	44.7	44.7	45.4
7.5-8.5	45.4	45.4	46.1
8.5-9.5	45.5	45.5	46.2
>9.5	45.1	45.2	45.8

Tableau 11 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode ISO 9613-2/EMPA

Cette méthode est identique à ISO 9613-2 (chapitre 7.3.1) à l'exception du coefficient de l'effet sol qui vaut -1 dB (pour toutes les fréquences). Dans le cas présent, la méthode « EMPA » correspond approximativement à la méthode ISO9613-2 avec  $G = 0.5$  (voir graphique 43).

### 7.3.3 Ljud från vindkraftverk

Le tableau 12 résume les résultats obtenus aux emplacements des mesurages avec différentes phases de vent.

Vitesse du vent en m/s	Ljud från vindkraftverk		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	40.2	40.3	40.8
5.5-6.5	44.4	44.5	44.9
6.5-7.5	46.3	46.3	46.8
7.5-8.5	47	47.1	47.5
8.5-9.5	47.1	47.2	47.6
>9.5	46.7	46.8	47.3

Tableau 12 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Ljud från vindkraftverk

### 7.3.4 Nord 2000

Le tableau 13 résume les résultats obtenus aux emplacements des mesurages avec différentes phases de vent.

Vitesse du vent en m/s	Nord 2000		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	39.5	39.2	39.2
5.5-6.5	43.7	43.4	43.4
6.5-7.5	45.6	45.3	45.3
7.5-8.5	46.3	46	46
8.5-9.5	46.4	46.1	46.1
>9.5	46	45.7	45.7

Tableau 13 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Nord 2000

### 7.3.5 Cnossos-EU

Le tableau 14 résume les résultats obtenus aux emplacements des mesurages avec différentes phases de vent.

Vitesse du vent en m/s	Cnossos-EU		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	36.9	37	37.4
5.5-6.5	41	41.1	41.6
6.5-7.5	42.9	43	43.5
7.5-8.5	43.6	43.7	44.2
8.5-9.5	43.7	43.8	44.3
>9.5	43.3	43.4	43.9

Tableau 14 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Cnossos

### 7.3.6 Harmonoise

La méthode de calcul prend en compte les effets météorologiques (classe de stabilité, direction du vent...). Nous avons donc testé différentes configurations soit :

- Trois classes de stabilité soit S1, S3 et S5 (à titre d'exemple)
- Deux différentes directions de vent 70° et 225° (principales directions sur le site retenu)

Les tableaux 15, 16 et 17 résument les résultats obtenus aux emplacements des mesurages avec différentes phases de vent.

Vitesse du vent en m/s	Harmonoise S1 70°			Harmonoise S1 225°		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	39.4	39.5	40.6	42	40.7	42
5.5-6.5	43.6	43.7	44.8	46.2	44.9	46.2
6.5-7.5	45.4	45.4	46.6	48.1	46.8	49.4
7.5-8.5	46.1	46.1	47.3	48.8	47.5	50.1
8.5-9.5	46.2	46.2	47.4	48.9	47.6	50.2
>9.5	44.7	45	45.5	49	48.3	48.4

Tableau 15 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Harmonoise (classe S1)

Vitesse du vent en m/s	Harmonoise S3 70°			Harmonoise S3 225°		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	41.8	40.5	41.9	42.5	41.9	43.6
5.5-6.5	46	44.7	46.1	46.6	46	47.8
6.5-7.5	47.4	47.2	47.9	48.5	47.9	49.4
7.5-8.5	48.1	47.9	48.6	49.2	48.6	50.1
8.5-9.5	48.2	48	48.7	49.3	48.7	50.2
>9.5	47.7	48	48.5	49	48.3	48.4

Tableau 16 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Harmonoise (classe S3)

Vitesse du vent en m/s	Harmonoise S5 70°			Harmonoise S5 225°		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	42.5	41.9	41.8	42.5	41.6	42.5
5.5-6.5	46.7	46.1	46	46.7	45.8	46.7
6.5-7.5	48.5	47.2	48.6	47.9	48.8	48
7.5-8.5	49.2	47.9	49.3	48.6	49.5	48.7
8.5-9.5	49.3	48	49.4	48.7	49.6	48.8
>9.5	47.7	48	48.5	49	48.3	48.4

Tableau 17 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Harmonoise (classe S5)

Le tableau 18 caractérise les minimums et maximums de l'ensemble des valeurs ci-dessus.

Vitesse du vent en m/s	Harmonoise Min.			Harmonoise Max.		
	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)	Point 1 (4.5 m)	Point 1 (9 m)	Point 2 (4.5 m)
4.5-5.5	39.4	39.5	40.6	42.5	41.9	43.6
5.5-6.5	43.6	43.7	44.8	46.7	46.1	47.8
6.5-7.5	45.4	45.4	46.6	48.5	48.8	49.4
7.5-8.5	46.1	46.1	47.3	49.2	49.5	50.1
8.5-9.5	46.2	46.2	47.4	49.3	49.6	50.2
>9.5	44.7	45	45.5	49	48.3	48.5

Tableau 18 : niveaux sonores moyens calculés avec la méthode Harmonoise

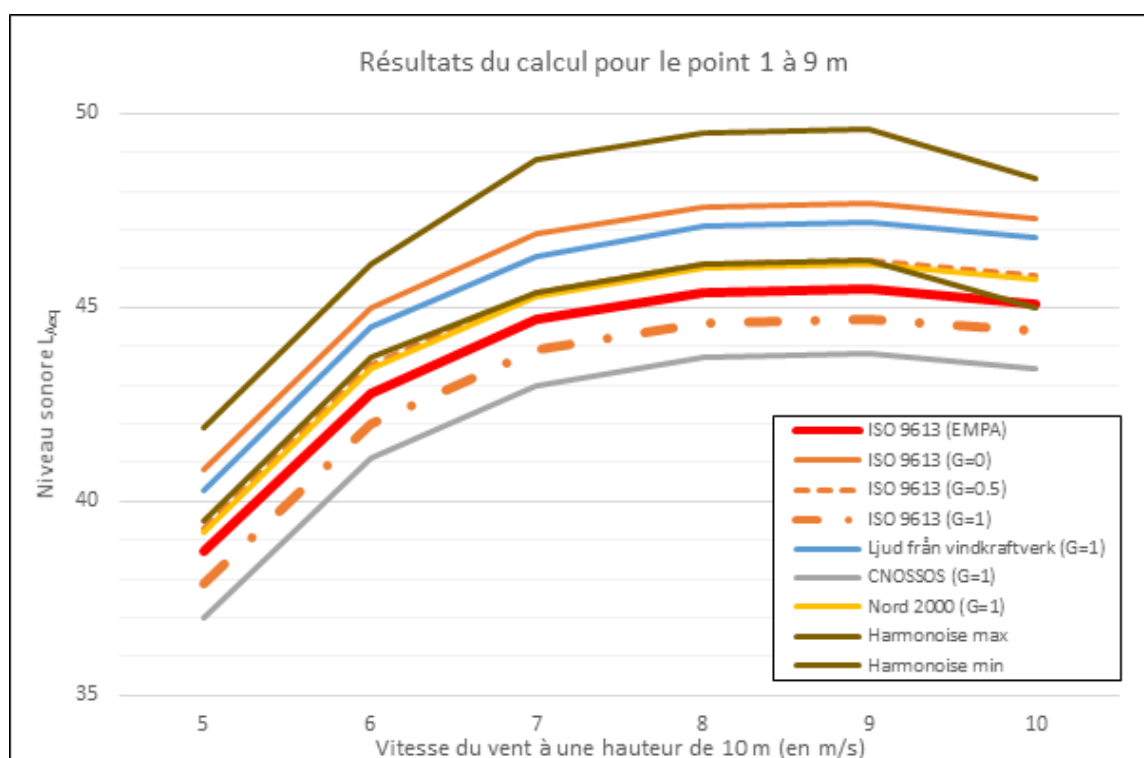
### 7.3.7 Comparaison des méthodes de calcul

Après avoir réalisé l'ensemble des méthodes de calcul, nous avons réuni les résultats sous forme de tableaux et graphiques par emplacement de mesurages.

Le tableau 19 et le graphique 17 résument les niveaux sonores théoriques selon les différentes méthodes utilisées pour le point 1 (hauteur 9 m).

		Point 1 (9 m)							
Vitesse du vent en m/s	Occurrence % Jour	ISO 9613 (EMPA)	ISO 9613 (G=0)	ISO 9613 (G=0.5)	ISO 9613 (G=1)	Ljud från vindkraftverk (G=1)	CNOSSOS (G=1)	Nord 2000 (G=1)	Harmonoise (G=1)
4.5-5.5	11.4	38.7	40.8	39.3	37.9	40.3	37.0	39.2	39.5 -> 41.9*
5.5-6.5	9.3	42.8	45.0	43.5	42.0	44.5	41.1	43.4	43.7 -> 46.1*
6.5-7.5	8.2	44.7	46.9	45.4	43.9	46.3	43.0	45.3	45.4 -> 48.8*
7.5-8.5	7.0	45.4	47.6	46.1	44.6	47.1	43.7	46.0	46.1 -> 49.5*
8.5-9.5	6.1	45.5	47.7	46.2	44.7	47.2	43.8	46.1	46.2 -> 49.6*
>9.5	15.1	45.1	47.3	45.8	44.4	46.8	43.4	45.7	45 -> 48.3*
<b>Leq annuel jour</b>		<b>42</b>	<b>44</b>	<b>42</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>42</b>	<b>42 -&gt; 45</b>

Tableau 19 : synthèse des niveaux sonores moyens calculés selon différentes méthodes (point 1 à 9 m)

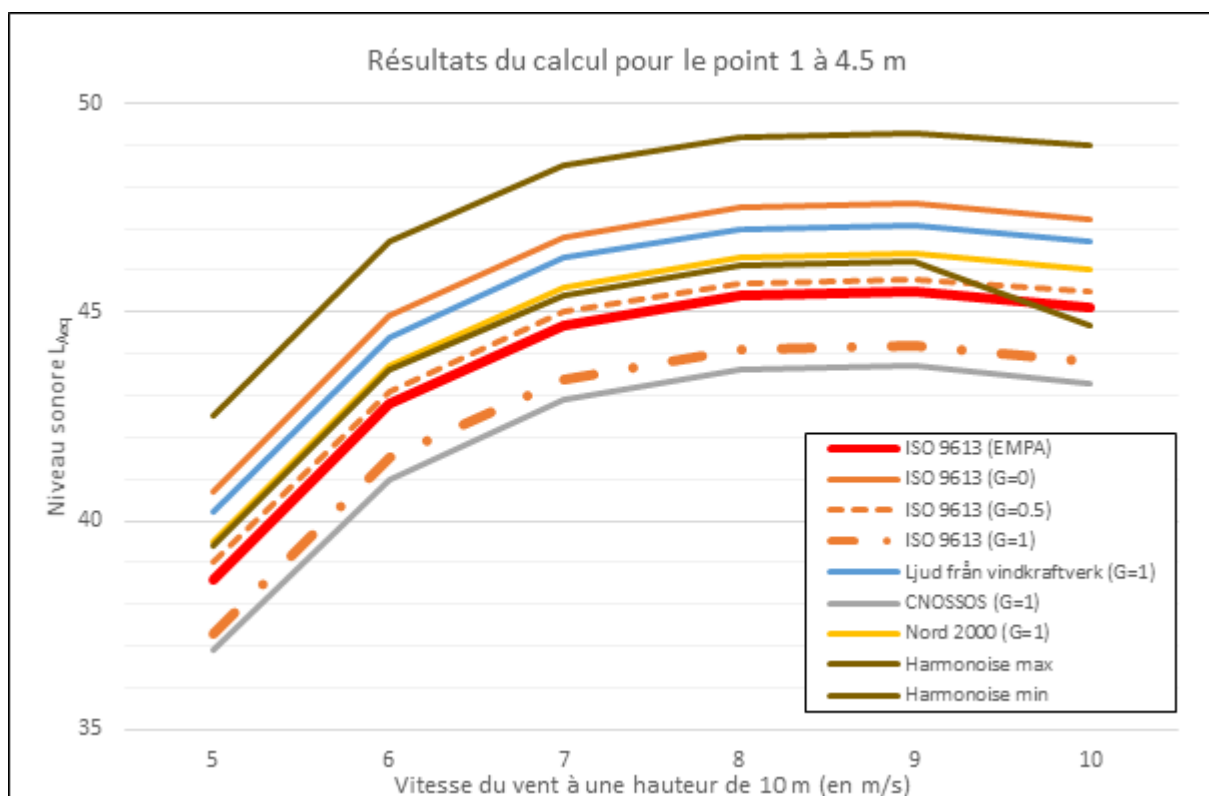


Graphique 17 : calcul théorique des niveaux sonores selon différentes méthodes en fonction du vent

Le tableau 20 et le graphique 18 résument les niveaux sonores théoriques selon les différentes méthodes utilisées pour le point 1 (hauteur de 4.5 m).

		Point 1 (4.5 m)							
Vitesse du vent en m/s	Occurrence % Jour	ISO 9613 (EMPA)	ISO 9613 (G=0)	ISO 9613 (G=0.5)	ISO 9613 (G=1)	Ljud från vindkraftverk (G=1)	CNOSSOS (G=1)	Nord 2000 (G=1)	Harmonoise (G=1)
5	11.4	38.6	40.7	39.0	37.3	40.2	36.9	39.5	39.4 -> 42.5
6	9.3	42.8	44.9	43.1	41.5	44.4	41.0	43.7	43.6 -> 46.7
7	8.2	44.7	46.8	45.0	43.4	46.3	42.9	45.6	45.4 -> 48.5
8	7.0	45.4	47.5	45.7	44.1	47.0	43.6	46.3	46.1 -> 49.2
9	6.1	45.5	47.6	45.8	44.2	47.1	43.7	46.4	46.2 -> 49.3
10	15.1	45.1	47.2	45.5	43.8	46.7	43.3	46.0	44.7 -> 49
<b>Leq annuel jour</b>		<b>42</b>	<b>44</b>	<b>42</b>	<b>40</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>43</b>	<b>42 -&gt; 45</b>

Tableau 20 : synthèse des niveaux sonores moyens calculés selon différentes méthodes (point 1 à 4.5 m)

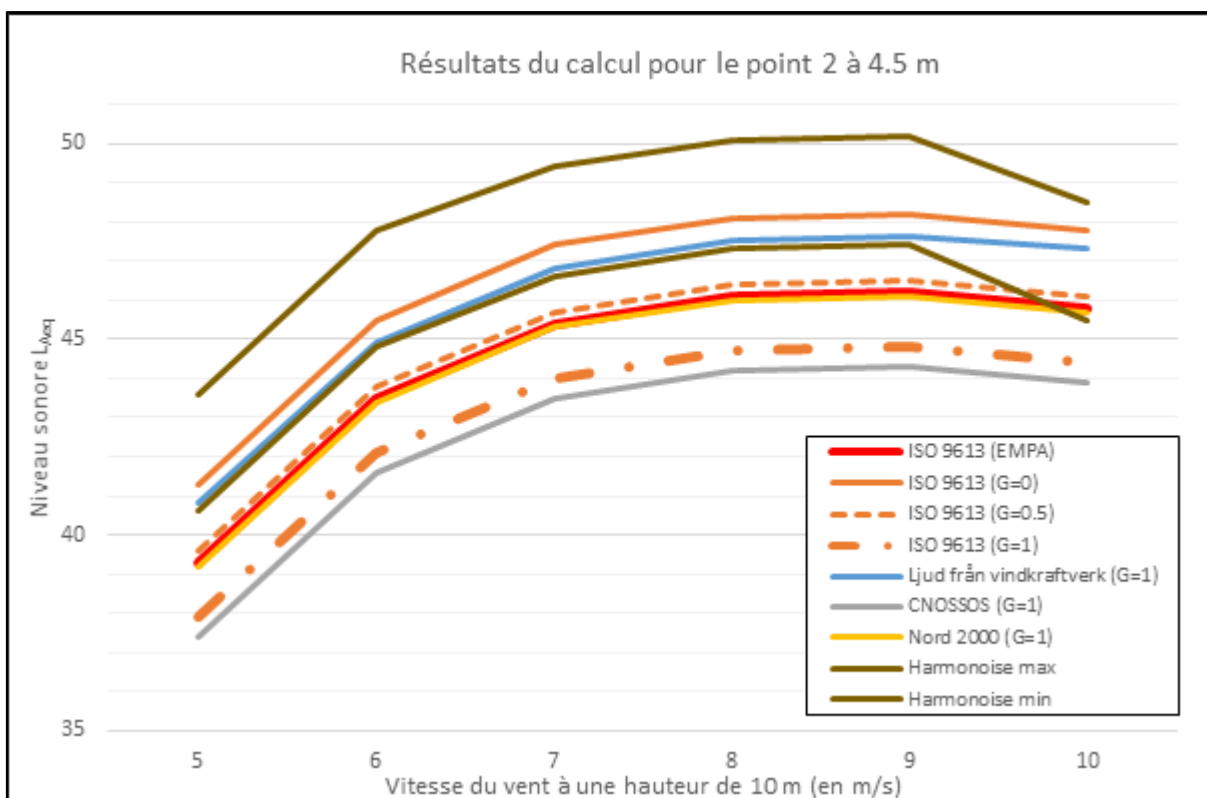


Graphique 18 : calcul théorique des niveaux sonores selon différentes méthodes en fonction du vent

Le tableau 21 et le graphique 19 résument les niveaux sonores théoriques selon les différentes méthodes utilisées pour le point 2 (hauteur de 4.5 m).

		Point 2 (4.5 m)							
Vitesse du vent en m/s	Occurrence % Jour	ISO 9613 (EMPA)	ISO 9613 (G=0)	ISO 9613 (G=0.5)	ISO 9613 (G=1)	Ljud från vindkraftverk (G=1)	CNOSSOS (G=1)	Nord 2000 (G=1)	Harmonoise (G=1)
5	11.4	39.3	41.3	39.6	37.9	40.8	37.4	39.2	40.6 -> 43.6
6	9.3	43.5	45.5	43.8	42.1	44.9	41.6	43.4	44.8 -> 47.8
7	8.2	45.4	47.4	45.7	44	46.8	43.5	45.3	46.6 -> 49.4
8	7.0	46.1	48.1	46.4	44.7	47.5	44.2	46	47.3 -> 50.1
9	6.1	46.2	48.2	46.5	44.8	47.6	44.3	46.1	47.4 -> 50.2
10	15.1	45.8	47.8	46.1	44.4	47.3	43.9	45.7	45.5 -> 48.5
<b>Leq annuel jour</b>		<b>42</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>41</b>	<b>44</b>	<b>40</b>	<b>42</b>	<b>43 -&gt; 46</b>

Tableau 21 : synthèse des niveaux sonores moyens calculés selon différentes méthodes (point 2 à 4.5 m)



Graphique 19 : calcul théorique des niveaux sonores selon différentes méthodes en fonction du vent

Pour ces 3 points, les résultats globaux (niveau sonore en moyenne annuelle) des différentes méthodes de calcul se situent à 42 dB(A) ± 2 dB(A), excepté la méthode Harmonoise max (Classe S5) qui présente des résultats plus élevés (46 dB(A)).

### 7.3.8 Conclusion des méthodes de calcul

Les résultats de ces calculs montrent que :

- Les principales méthodes de calcul testées ne prennent pas en compte les effets météorologiques (excepté la méthode Harmonoise) ; la propagation du bruit est donc considérée comme indépendante de la vitesse et de la direction du vent.
- Les résultats des différentes méthodes de calcul se situent dans un intervalle de  $\pm 2$  dB(A), excepté Harmonoise (Classe S5). Cet écart est relativement faible en relation avec les incertitudes générales liées à ce type de calcul (entre -6 et +3 dB(A) selon l'EMPA).
- La méthode Suisse (EMPA) se distingue des autres méthodes avec l'utilisation d'un facteur de correction unique pour l'effet sol (+1 dB(A)). Cela pourrait se justifier étant donné les spécificités du bruit des éoliennes (hauteur de la source et présence de basses fréquences). Toutefois, du fait des incertitudes élevées inhérentes à ce type de calcul de propagation et en comparaison avec les autres méthodes cette simplification ne nous semble pas pertinente. De plus, cela introduit un biais dans la modélisation et ne traduit pas correctement les différentes configurations qui peuvent être rencontrées, par exemple :
  - aucune distinction par rapport à la hauteur du point récepteur (rez-de-chaussée, 1<sup>er</sup> étage, 2<sup>ème</sup> étage...),
  - pas de prise en compte de la composition du sol : forêt, herbe, surface dure par exemple goudronnée.
- La méthode recommandée en Suisse (EMPA) fournit des valeurs environ 1 à 3 dB(A) plus élevées que la méthode complète ISO 9613-2 (avec G=1 pour un sol en herbe ou prairie). L'écart dépend toutefois de la hauteur du point récepteur par rapport au sol. En effet, pour un récepteur situé en hauteur (1<sup>er</sup> étage ou 2<sup>ème</sup> étage d'un bâtiment), l'effet sol est relativement faible et donc la différence entre les 2 méthodes peu marquée (moins de 2 dB(A)). Par contre, pour les récepteurs proches du sol (rez-de-chaussée), l'effet sol est plus important avec la méthode complète ISO 9613-2 et dans ce cas la différence entre les 2 méthodes est plus importante (2 à 3 dB(A)).

En conclusion, la méthode recommandée en Suisse pour calculer le bruit des éoliennes est tout à fait comparable à celles utilisées dans les autres pays voisins, même si la simplification proposée concernant l'effet sol reste discutable. Toutes ces méthodes ont adopté une approche simplifiée de la propagation du bruit qui ne tient, le plus souvent, pas compte des effets liés à la météorologie.

## 8 Evaluation des résultats

Ce chapitre présente l'analyse des différents résultats obtenus en se concentrant sur la comparaison entre les résultats obtenus par mesurage et ceux obtenus par calcul.

En ce qui concerne les résultats des mesurages, la méthode proposée a permis déjà de valider un certain nombre d'éléments concernant le matériel et l'instrumentation, la durée nécessaire pour couvrir les différentes conditions météorologiques, les différents paramètres à documenter (niveau sonore, vitesse du vent...), les périodes utilisables (de nuit entre 22h00 et 04h00), ainsi que le choix des emplacements de mesurages.

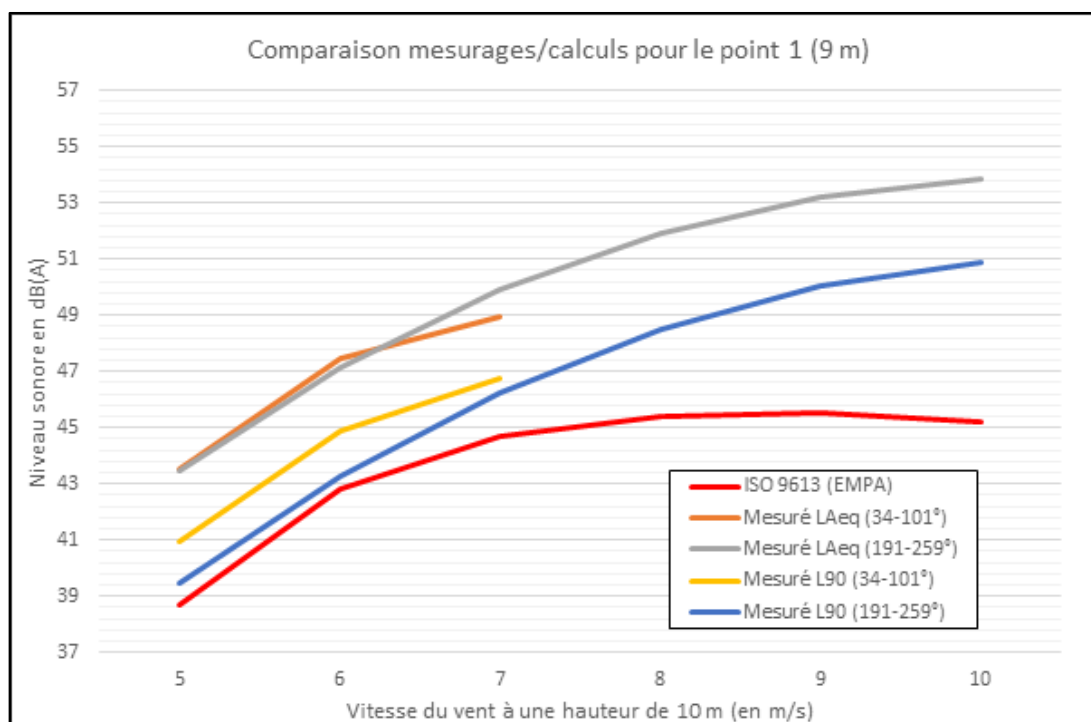
Par contre, étant donné les spécificités de ce site (situation sur la crête avec une forte exposition au vent), il n'a pas été possible d'extraire précisément le bruit des éoliennes de l'influence des bruits de fond, même si le bruit des éoliennes est audible sur les enregistrements audio. Les bruits de fond (principalement le bruit du vent dans la végétation) sont relativement élevés sur ce site du fait de la proximité de la forêt et de la situation très exposée au vent (sur la crête). Dans cette configuration, les niveaux sonores mesurés représentent le bruit de l'éolienne combinés aux bruits de fond, même après suppression d'une grande quantité de bruits perturbateurs. Les différentes méthodes testées (choix de périodes avec une audibilité marquée du bruit des éoliennes, analyse des niveaux sonores par tiers d'octave, analyse statistique  $L_{90}$ ) n'ont pas permis d'isoler précisément le bruit des éoliennes.

En ce qui concerne les résultats des calculs, la méthode recommandée en Suisse pour déterminer le bruit des éoliennes est tout à fait comparable à celles utilisées dans les pays voisins. Toutes ces méthodes ont adopté une approche simplifiée de la propagation du bruit qui ne tient le plus souvent pas en compte des effets liés à la météorologie. La méthode préconisée en Suisse (EMPA) fournit globalement des résultats 1 à 3 dB(A) plus élevée que la norme ISO 9613-2 en raison de l'emploi d'un facteur unique concernant l'effet sol.

La comparaison entre les résultats des mesurages et les résultats de la modélisation doit donc être réalisée avec prudence du fait que le niveau de bruit des éoliennes (sans les bruits de fond) n'a pas pu être déterminé avec précision.

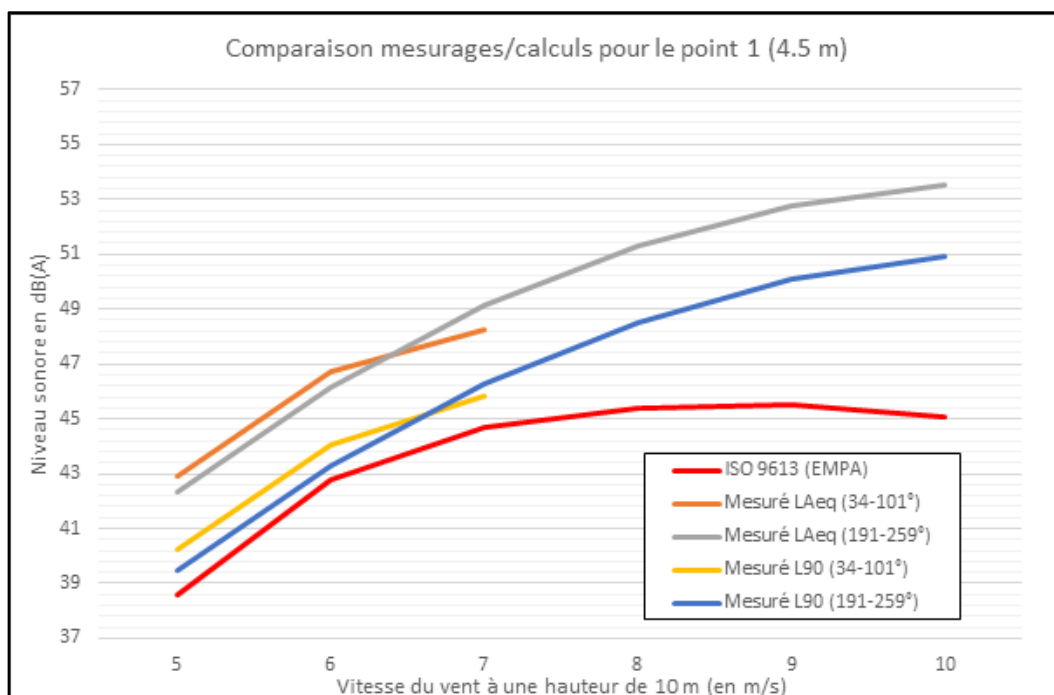
### 8.1 Comparaison mesurages/calculs

Ce chapitre présente la comparaison des résultats des mesurages par rapport à ceux des calculs (méthode EMPA). Le graphique 20 regroupe les niveaux sonores mesurés ( $L_{Aeq}$  et  $L_{90}$ ) dans les deux directions et les niveaux calculés selon ISO 9613-2 (modifié EMPA) pour le point 1 (hauteur 9 m).



Graphique 20 : niveaux sonores du point 1 (9 m) en fonction du vent

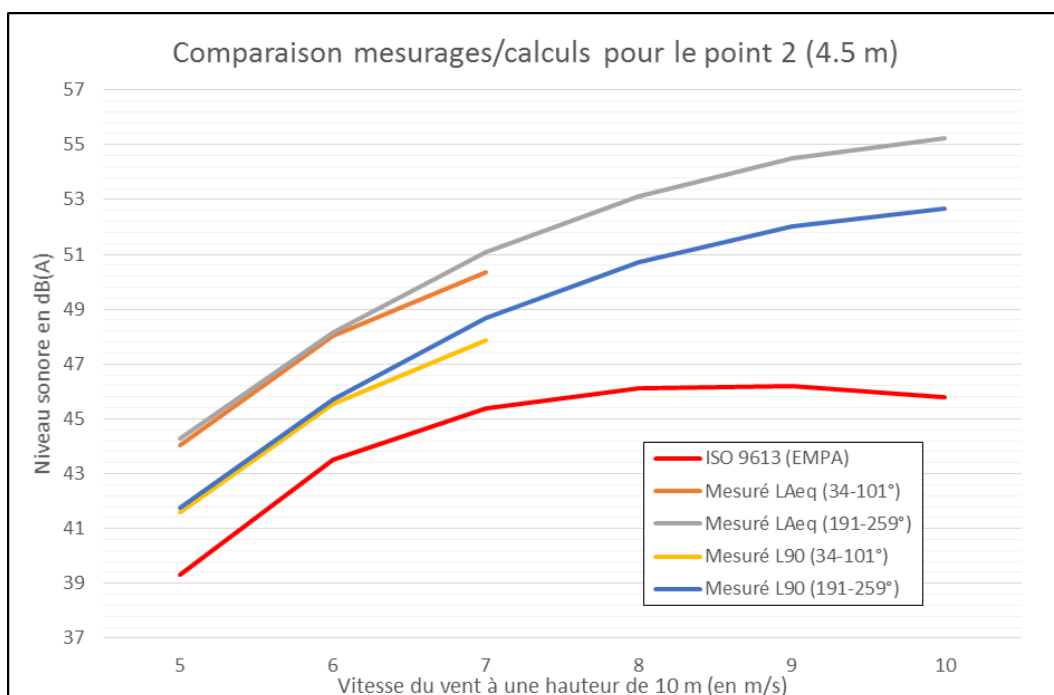
Le graphique 21 regroupe les niveaux sonores mesurés ( $L_{Aeq}$  et  $L_{90}$ ) dans les deux directions et les niveaux calculés selon ISO 9613-2 (modifié EMPA) pour le point 1 (hauteur 4.5 m).



Graphique 21 : niveaux sonores du point 1 (4.5 m) en fonction du vent

Les niveaux sonores mesurés  $L_{Aeq}$  (graphiques 20 et 21) sont nettement plus élevés que la prédiction selon ISO 9613-2 (EMPA) de l'ordre de 4 à 9 dB(A) (en particulier pour les vitesses de vent élevées). Par contre les niveaux sonores  $L_{90}$  sont proches (< 1 dB(A)) pour des vitesses de vent comprises entre 5 et 7 m/s mais l'écart augmente lorsque que la vitesse du vent augmente allant jusqu'à 6 dB(A) de différence (à 10 m/s).

Le graphique 22 regroupe les niveaux sonores mesurés ( $L_{Aeq}$  et  $L_{90}$ ) dans les deux directions et les niveaux calculés selon ISO 9613-2 (modifié EMPA) pour le point 2 (hauteur 4.5 m).



Graphique 22 : niveaux sonores du point 2 (4.5 m) en fonction du vent

Les niveaux sonores  $L_{Aeq}$  sont nettement plus élevés que la prédiction selon ISO 9613-2 (modifié EMPA) de l'ordre de 5 à 10 dB(A). Par contre les niveaux sonores  $L_{90}$  sont plus élevés de l'ordre de 2 à 7 dB(A).

Le tableau 22 résume les niveaux sonores annuels jour mesurés et calculés.

	Point 1 (9 m)	Point 1 (4.5 m)	Point 2 (4.5 m)
$L_{Aeq}$ annuel mesuré (jour)	49	48	50
$L_{90}$ annuel mesuré (jour)	46	46	48
$L_{Aeq}$ calculé ISO 9613-2 (Empa)	42	42	42
$L_{Aeq}$ calculé ISO 9613-2 (G=1)	41	40	41

Tableau 22 : synthèse des niveaux sonores (moyenne annuelle de jour) déterminés par mesurage et par calcul

**Les niveaux sonores moyens globaux ( $L_{Aeq}$  moyenne annuelle de jour) obtenus par mesurages sont de 6 à 8 dB(A) plus élevés que les valeurs obtenues par modélisation. Si l'on tient compte de l'indice  $L_{90}$ , la différence est de 4 à 6 dB(A). La différence entre les mesurages et la modélisation est particulièrement importante avec une vitesse de vent élevée ( $v > 7$  m/s).**

**Cet écart important entre les résultats des mesurages et les résultats des calculs s'explique par le fait que les résultats des mesurages comprennent le bruit de l'éolienne additionné du bruit du vent dans la végétation.**

## 8.2 Perspectives

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche ont mis en évidence les limites de la méthode de mesurage retenue. En effet, la méthode de mesurage choisie (relativement simple avec des résultats disponibles rapidement) n'a pas permis d'obtenir des résultats représentatifs du bruit précis des éoliennes étant donné les importantes perturbations liées au bruit de fond.

Dans ce sens, il serait utile de pouvoir compléter ces mesurages par :

- Une analyse plus détaillée des données audio récoltées : analyse fréquentielle plus poussée, par exemple en bande fine (FFT, sonogramme). Cette méthode pourrait permettre de mettre en évidence des raies spectrales spécifiques (par exemple 130 Hz selon données fabricant) et l'audibilité du bruit des éoliennes. Cette analyse pourrait se faire avec les données actuellement à disposition (enregistrements audio) sans devoir effectuer des mesurages complémentaires sur le site.
- Une détermination plus précise du bruit de fond sur ce site : pour cela, une campagne de mesurages complémentaires serait nécessaire sur le même site avec des périodes à fort vent et avec l'éolienne arrêtée (mesurages « stop and go » avec alternance rapprochée).
- De nouveaux emplacements de mesurages moins exposés au vent : parallèlement à cette campagne de mesurages, il serait possible de compléter les emplacements des mesurages en choisissant en plus des lieux moins exposés au vent et donc des lieux où l'émergence potentielle du bruit des éoliennes serait plus marquée.
- Extension de ce projet à d'autres parcs éoliens : cela permettrait de vérifier si les conditions rencontrées dans d'autres parcs éoliens sont similaires (conditions de mesurage et de propagation).

Du point de vue des méthodes de calcul, les méthodes les plus courantes sont relativement équivalentes. Des investigations supplémentaires seraient utiles concernant de l'effet sol (selon différents types de sol) et son influence sur les niveaux sonores du bruit des éoliennes à différentes hauteurs (rez-de-chaussée ou 1<sup>er</sup> étage par exemple).

## 9 Conclusions

En ce qui concerne les résultats des mesurages, la méthode proposée a permis de valider un certain nombre d'éléments concernant :

- le matériel et l'instrumentation, en particulier les systèmes de boules des microphones,
- la durée nécessaire pour couvrir les différentes conditions météorologiques,
- les différents paramètres à documenter (niveau sonore, vitesse du vent...),
- les périodes utilisables, en particulier de nuit (entre 22h00 et 04h00),
- l'importance du choix des emplacements de mesurages.

Les mesurages des niveaux sonores se sont déroulés entre le 12 mai et le 12 juin 2015. Nous avons choisis 2 emplacements de mesurages soit à 200 m de chaque côté d'une éolienne et dans la direction des vents dominants. Sur un des emplacements nous avons positionné deux microphones à des hauteurs différentes soit 4.5 m et 9 m. Pendant la durée des mesurages nous avons mesuré les conditions climatiques du site (vitesse et direction du vent, pluie) proches des microphones (hauteurs de 1.5 m, 4.5 m et 9 m). Les données de l'éolienne (vitesse et direction du vent) et des microphones ( $L_{Aeq}$ ,  $L_{90}$ , spectre, audio) ont été réunies par intervalles de 1 min. Après analyse des données, nous en avons déduit que la plage horaire sans perturbation extérieure (circulation, bruit d'animaux, travaux...) était de nuit entre 22h et 4h du matin. Les niveaux sonores annuels de jour ( $L_{Aeq}$ ) sont de l'ordre de  $49 \pm 1$  dB(A) pour les trois points de mesurages (sans déduction du bruit de fond). Nous n'avons pas pu arrêter l'éolienne pour nous permettre de mesurer le bruit de fond lors des différentes phases de vent. D'autres pays (par ex : Australie, Nouvelle-Zélande, Angleterre...) utilisent l'indice  $L_{90}$  pour déterminer le bruit de l'éolienne. Cet indice permettrait de supprimer en partie les bruits perturbateurs (bruit du vent dans l'environnement). Le niveau sonore  $L_{90}$  mesuré est de 2 à 3 dB(A) inférieur au niveau  $L_{Aeq}$ . Nous avons constaté que dans le cas présent, le bruit dans l'environnement (bruit de la végétation lors de forts vents) est particulièrement élevé et l'utilisation de cet indice ne permet pas de garantir que ce niveau est effectivement celui du bruit de l'éolienne exclusivement. L'audibilité du bruit des éoliennes sur ces sites de mesurages est donc relativement faible (peu de perception des composantes tonales et impulsives, ainsi que des phénomènes de modulation d'amplitude).

Nous avons modélisé le site du parc éolien à l'aide du logiciel CadnaA avec des courbes de niveau tous les mètres. Ce logiciel nous permet d'utiliser différentes méthodes de calcul (ISO 9613-2, Ljud från vindkraftverk, Nord 2000, Cnossos-EU et Harmonoise). Nous avons placé des récepteurs aux mêmes emplacements que ceux des mesurages. La méthode officielle en Suisse est l'utilisation de la norme ISO 9613-2 (modifié EMPA) avec une correction (hausse du niveau acoustique) générale de +1 dB(A) pour l'effet sol. Le niveau sonore annuel de jour ( $L_{Aeq}$ ) calculé est de l'ordre de 42 dB(A)  $\pm$  2 dB(A) en moyenne pour l'ensemble des méthodes de calcul pour les trois points de mesurages.

Nous avons comparé les niveaux mesurés à ceux calculés pour l'ensemble des trois points. Les niveaux mesurés (avec une prédominance du bruit du vent dans la végétation) sont de l'ordre de 7 dB(A) plus élevés que ceux prédits par les calculs (en moyenne annuelle). Mais le niveau de bruit de fond (bruit de l'environnement : vent dans la végétation) n'a pas pu être déduit du niveau global mesuré.

Afin de pouvoir optimiser la méthode de mesurage, il serait nécessaire de pouvoir effectuer des analyses plus fines des enregistrements audio (analyse FFT), compléter les données avec une campagne de mesurages complémentaires avec l'arrêt de l'éolienne et plusieurs emplacements de mesurages (aussi dans des secteurs moins exposés au vent) et étendre ce procédé à d'autres parcs éoliens.

# 10 Références

## Normes et directives suisses

- [1] Office fédéral de l'énergie OFEN, *Recommandations pour la planification d'installations éoliennes. Utilisation des instruments de l'aménagement du territoire et critères de sélection des sites*. 1<sup>er</sup> mars 2010.
- Etat de Vaud, DGE, Service du développement territorial, Service des routes, Service de la mobilité, *Directives cantonales pour l'installation d'éoliennes de hauteur totale supérieure à 30 mètres*, version 3.3, juillet 2013.
- [2] EMPA, Untersuchungsbericht Nr. 452'460, *Lärmmittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen*, Dübendorf, 22. Januar 2010.

## Etudes suisses

- HÜBNER Gundula, LÖFFLER Elisabeth, HAMPL Nina et WÜSTENHAGEN Rolf, *Wirkungen von Windkraftanlagen auf Anwohner in der Schweiz : Einflussfaktoren und Empfehlungen*, 28 Oktober 2013.
- HEUTSCHI Kurt, PIEREN Reto, MÜLLER Menno, MANYOKY Madeleine, WISSEN HAYEK Ulrike et EGGENSCHWILER Kurt, *Auralization of wind turbine noise : propagation filtering and vegetation noise synthesis*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 100 (2014) pp. 13-24.
- PIEREN Reto, HEUTSCHI Kurt, MÜLLER Menno, MANYOKY Madeleine et EGGENSCHWILER Kurt, *Auralization of wind turbine noise : emission synthesis*, Acta Acustica united with Acustica Vol. 100 (2014) pp. 25-33.
- FALOURD Xavier et al., *Low frequency amplitude modulation related to Doppler frequency shift: An experimental study diameter wind turbine in a Swiss valley*, Wind Turbine Noise 2015.
- FALOURD Xavier et al., *Doppler analysis and processing for the localization of low frequency tonal sound sources on blades: An experimental approach*, Wind Turbine Noise 2015.

## Méthodes de calcul

- [7] Norme ISO 9613-1, *Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'aire libre – Partie 1 : Calcul de l'absorption atmosphérique*, édition 1993.
- [6] Norme ISO 9613-2, *Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre – Partie 2 : Méthode générale de calcul*, édition 1996.
- [8] Ljud från vindkraftverk, Naturvårdsverket, rapport 6241, décembre 2011.
- [9] Nord 2000, Comprehensive outdoor sound propagation, Model Part1: Propagation in an atmosphere without significant refraction, revised 31 march 2006.
- [10] Common Noise Assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU), report EUR 25379 EN, 2012.
- [11] SALOMONS Erik, VAN MAERCKE Dirk, DEFRANCE Jérôme, DE ROO Foort, *The Harmonoise sound propagation model*, 22 January 2010.
- [12] DEFRANCE Jérôme et al., *Outdoor sound propagation reference model developed in the European harmonoise project*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 93 (2007) pp. 213-227.
- [13] SALOMONS Erik et al., *The Harmonoise sound propagation model*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 97 (2011) pp. 262-74.
- [14] PROBST Wolfgang, *Comparison of noise prediction methods*, International congress on sound & vibration, ICSV18, Rio de Janeiro Brazil, 10-14 July 2011.
- [15] Directive (UE) 2015/996 de la commission du 19 mai 2015 « établissant des méthodes communes d'évaluation du bruit conformément à la directive 2002/49/CE » du Parlement européen et du Conseil.

## Méthodes de mesurage

- [5] Norme française, Projet NF S 31-114, *Acoustique – Mesurage du bruit dans l'environnement avec et sans activité éolienne*, version du 7.7.2011 homologuée par décision du Directeur général d'AFNOR.
- [16] IEC International Standard, *IEC 61400-11, Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*, Edition 3.0, 2012-11.
- [3] Norme ISO 1996-2:2007, *Méthode générale pour le mesurage du bruit à l'extérieur*.
- [4] Norme française NF S 31-010, *Acoustique – Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Méthodes particulières de mesurage*, 1996.

## Europe

- EWEA, The european wind energy association asbl/vzw, *Noise regulation and wind energy deployment in EU member states. A report from the national association network*, November 2012.

## Allemagne

- AGATZ Monica, GATZEN Cornelia, LINDEMANN Gerd et SAHRHAGE Arnd, Staatliches Umweltamt Herten, *Windenergie Handbuch*, Informationstexte StUA Herten, Band 3 : Windenergieanlagen, Dezember 2006.
- AGATZ Monica, Kreis Borken, *Windenergie Handbuch*, Dezember 2009.
- DETLEF Piorr, *Gesetzliche Grundlagen und Beurteilungskriterien der Geräuschemissionen von Windenergieanlagen*, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46 (1999) Nr.4 – Juli pp. 117-122.
- KÖTTER Jürgen, *Planung von Vorbehaltsflächen für Windenergieparks*, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46 (1999) Nr.4 – Juli pp. 123-126.
- SCHÄLLIG Arno, *Emissionsmessungen bei Windenergieanlagen*, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46 (1999) Nr.4 – Juli pp. 127-135.
- FRONZ Wolfgang, DETLEF Piorr et KINDEL Rainer, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, *Materialien Nr. 63, Windenergieanlagen und Immissionsschutz*, Landesumweltamt NRW, Essen 2002.

## France

- *Spécial éoliennes*, écho bruit, le magazine de l'actualité de l'environnement sonore, juin 2008 n°121.
- AFSSET Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, *Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes. Etat des lieux de la filière éolienne. Propositions pour la mise en œuvre de la procédure d'implantation*, mars 2008.

## Amérique du nord

- NARUC The National Association of Regulatory Utility Commissioners, *Assessing sound emissions from proposed wind farms & measuring the performance of completed projects*, October 2011.
- Massachusetts Department of Environmental Protection Massachusetts Department of Public Health, *Wind turbine health impact study : report of independent expert panel*, January 2012.

## Australie

- New Zealand Standard, *Acoustics – Wind farm noise*, NZS 6808: 2010.
- EPA, Environment Protection Authority, *Wind farms environmental noise guidelines*, ISBN 978-1-876562-43-9, July 2009.
- Institute of Acoustics, *A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise*, May 2013.

## Mesurage

- DETLEF Piorr, *Lärmschutzgerechter Betrieb von Windenergieanlagen und messtechnische Überprüfung*, Lärmbekämpfung Bd. 9 (2014) Nr. 2 – März pp. 88-92.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NordrheinWestfalen (LANUV NRW), *Geräuschemissionen hoher Windenergieanlagen*, LANUV-Fachbericht 3, 2007, ISSN 1864-3930.
- HU Zheng, MARTINEZ Sergio et KURTZ Wilhelm, *Messverfahren zur Bestimmung der Geräuschemission von Windenergieanlagen*, Lärmbekämpfung, Bd. 5 (2010) Nr. 4 – Juli pp.130-138.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, *Langzeit-Geräuschemissionsmessung an der 1 MW-Windenergieanlage Nordex N54 in Wiggensbach bei Kempten (Bayern)*, Januar 2000.
- Windtest Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH, *Schalltechnisches Gutachten zu einer Windenergieanlage des Typs V90-2MW VCS (Mode 0) bei Porep, Deutschland*, Oktober 2006.
- Kötter Consulting Engineers, *Über die Ermittlung der Schallemissionen einer Windenergieanlage des Typs Vestas V90-2.0 MW im « Mode 2 » in 49134 Wallenhorst*, Schalltechnischer Bericht Nr. 29093-1.006, 24.01.2007.
- HESSLER David M., *Wind tunnel testing of microphone windscreen performance applied to field measurements of wind turbines*, Wind turbine noise, Aalborg, Denmark, 17-19 June 2009.

## Modélisation

- KALISKI Kenneth et DUNCAN Eddie, *Propagation modeling parameters for wind power projects*, Sound & Vibration /december 2008 pp. 12-15.
- SENAT Claude, GARRIGUES Sébastien et GAMBA René, *Calculate noise of wind-farms*, Wind turbine noise, Lyon, France, 20-21 september 2007.
- PARRY Graham, *A review of the use of different noise prediction models for windfarms and the effects of meteorology*, Acoustics 08, Paris, pp. 4033-4038.
- FORSSEN Jens, SCHIFF Martin, PEDERSEN Eja et PERSSON WAYE Kerstin, *Wind turbine noise propagation over flat ground : measurements and predictions*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 96 (2010) pp. 753-760.
- PROBST Wolfgang, *Wind turbine noise prediction with CadnaA*, May 2008.
- PROSPATHOPOULOS John M. et VOUTSINAS Spyros G., *Noise propagation issues in wind energy applications*, J.Sol Eng. 127(2), pp 234-241, 25 April 2005.
- ENGELEN Justus, *Experimental evaluation of the propagation conditions for sounds of wind turbines at night in comparison with calculations according to DIN ISO 9613-2*, AIA-DAGA 2013 Merano, pp 628-629.

## Autres

- YANO Hiroo, OHTA Tatsuya et TACHIBANA Hideki, *Development of measurement system for wind turbine noise*, International meeting low frequency noise and vibration and its control, Stratford upon Avon UK, 22-24 May 2012.
- TACHIBANA Hideki, YANO Hiroo et FUKUSHIMA Akinori, *Assessment of wind turbine noise in immission areas*, International conference on wind turbine noise, Denver 28-30 August 2013.
- KAWAKAMI Fukushi, INAMOTO Susumu, TERAZONO Shinichi, INOUE Yasuo et SANO Takayuki, *Development of waterproof low-frequency windscreen with extended noise reduction*, Journal of basic and applied physics, Aug, 2013, Vol. 2 Iss. 3, pp. 127-133.
- NOVAK Colin, SJÖSTRÖM Anders, ULE Helen, BARD Delphine et SANDBERG Göran, *An investigation of different secondary noise wind screen designs for wind turbine noise applications*, Inter-noise, Melbourne Australia, 16-19 November 2014.
- BUNK Olivier, *Ausnutzung der Richtcharakteristik zur Ertragssteigerung von Windenergieanlagen an vorbelasteten Standorten*, Lärmbekämpfung Bd. 9 (2014) Nr.1 – Januar.
- Delta for Energinet.dk, *Noise and energy optimization of wind farms. Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise*, 30 September 2009. Revised 8 October 2009.

## Wind Turbine Noise 2015, Glasgow, 20 – 23 April 2015

### Sound Propagation

- SIMS Jonathan, BULLMORE Andrew, VAN RENTERGHEM Timothy, HOROSHENKOV Kirill, *Wind turbine noise propagation - Results of numerical modelling techniques to investigate specific scenarios*, Wind Turbine Noise 2015.
- TIAN Y., COTTÉ B., *Modelling of ground and atmospheric effects on wind turbine noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- ENGELEN Justus, *Metrological validation of the DIN ISO 9613-2 propagation model concerning wind turbine noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- COULON Moise, *Directivity noise attenuation values for large wind turbines – Research based on long term measurements*, Wind Turbine Noise 2015.
- BIRCHBY Andrew, CASSIDY Matthew, BASS Jeremy, *Propagation of noise from wind farms according to the institute of acoustics' good practice guide – A sensitivity analysis*, Wind Turbine Noise 2015.
- HANSEN Kristy L., HESSLER George, HANSEN Colin H., ZAJAMSEK Branko, *Prediction of infrasound and low frequency noise propagation for modern wind turbines – a proposed supplement to ISO 9613-2*, Wind Turbine Noise 2015.

### Health effects and annoyance

- MICHAUD David S., *Wind turbine noise and health study: summary of results*, Wind Turbine Noise 2015.

## Regulations

- GOEMÉ Arjan, *Comparative analysis of wind turbine noise assessment and rating procedures in the UK, France and the Netherlands*, Wind Turbine Noise 2015.
- SCHILD Jérémy, CHAVAND Vincent, *State of the art and new perspectives for the development of noise regulation of wind farms*, Wind Turbine Noise 2015.
- VAN DEN BERG Frits, *A history of wind turbine noise regulations in the Netherlands*, WTN 2015.
- BAUERDORFF Andrea, MYCK Thomas, *Noise protection regulations for wind turbines in Germany*, Wind Turbine Noise 2015.
- FREDIANELLI Luca, GALLO Paolo, LICITRA Gaetano, PALAZZUOLI Diego, CARPITA Stefano, *Sensitivity analysis test on the Italian ISPRA-ARPAT methodology to assess noise impact of operational wind farms*, Wind Turbine Noise 2015.

## Aeroacoustic noise source

- STALNOV Oksana, CHAITANYA Paruchuri, JOSEPH Philipp F., *On the measurement and prediction of wind-turbine trailing-edge noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- GERHARD T., ERBSLÖH S., CAROLUS T., *An experimental and numerical parameter study on trailing edge blowing for reduced trailing edge noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- HURAUULT J., GUPTA A., SLOTH E., NIELSEN N.C., BORGOLTZ A., RAVETTA P., *Aeroacoustic wind tunnel experiment for serration design optimisation and its application to a wind turbine rotor*, Wind Turbine Noise 2015.

## Background and turbine noise at receivers

- DUNCAN Eddie, KALISKI Kenneth, OLD Isaac, LOZUPONE David-Michael, *Methods for assessing background sound levels during post-construction compliance monitoring within a community*, Wind Turbine Noise 2015.
- TREFROIS Vincent L.J., DASSE Stéphane, *Wind turbine noise measurement: an efficient and reliable method for extracting the wind turbine noise out of the background noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- FUKUSHIMA Akinori, KOBAYASHI Tomohiro, TACHIBANA Hideki, *Practical measurement method of wind turbine noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- DELAIRE Christophe, GRIFFIN Daniel, ADCOCK Justin, RICHARDS Andrew, RYAN Bridget, *Research into a continuous wind farm noise monitoring system*, Wind Turbine Noise 2015.
- PETITJEAN Benoit P., AMBEKAR Akshay, DROBIETZ Roger, KINZIE Kevin, *Noise optimized wind park operation*, Wind Turbine Noise 2015.

## Amplitude modulation

- EVANS Tom, COOPER Jonathan, *Tonal noise from wind turbines*, Wind Turbine Noise 2015.
- PERKINS Richard, *From good practice guidance to solving amplitude modulation for wind turbine noise assessment in the UK*, Wind Turbine Noise 2015.
- MADSEN Helge Aa., BERTAGNOLIO Franck, FISCHER Andreas, BAK Christian, *An overview of recent research on AM and OAM of wind turbine noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- GAVIN Irvine, *The Institute of Acoustics' Working Group on amplitude modulation in wind turbine noise - Progress towards an agreed rating and assessment metric*, Wind Turbine Noise 2015.
- CAND Matthew, BULLMORE Andrew, *Measurements demonstrating mitigation of far-field AM from wind turbines*, Wind Turbine Noise 2015.  
CASSIDY Matthew, BASS Jeremy, *Addressing the issue of amplitude modulation: a developer's perspective*, Wind Turbine Noise 2015.
- CHEONG Cheolung, STALNOV Oksana, JOSEPH Philipp, *On the measurement and prediction of wind turbine swishing noise*, Wind Turbine Noise 2015.
- DI NAPOLI Carlo, LEHTO Panu, *Current challenges of assessing excess amplitude modulation character in wind turbine noise during EIA/planning phase*, Wind Turbine Noise 2015.
- ECOTIERE David, *Can we really predict wind turbine noise with only one point source?* Wind Turbine Noise 2015.
- YOKOYAMA Sakae, KABAYASHI Tomohiro, SAKAMOTO Shinichi, TACHIBANA Hideki, *Subjective experiments on the auditory impression of the AMPLITUDE modulation sound contained in wind turbine noise*, Wind Turbine Noise 2015.