



## **Mesure du Bruit Éolien à l'Immission**

B. Fauville et F. Moïny  
UMONS, 9 rue de Houdain, 7000 Mons, Belgique  
[benoit.fauville@umons.ac.be](mailto:benoit.fauville@umons.ac.be)

Depuis une quinzaine d'années, le nombre d'éoliennes installées en Europe et ailleurs ne cesse d'augmenter. Dans ce contexte, de nombreuses critiques ont été émises quant aux bruits émis par les éoliennes en fonctionnement et perçus dans le voisinage direct des parcs éoliens. Les bruits émis peuvent être d'origine mécanique ou aérodynamique, ces derniers, pouvant présenter une modulation en amplitude, étant prépondérants. Dans le but de comprendre les causes physiques liées à la gêne sonore éventuellement induite, nous avons réalisé un ensemble de mesures à l'immission près de parcs éoliens afin de caractériser l'environnement sonore proche de ceux-ci et le fonctionnement des éoliennes. Nous présentons les spécificités du bruit éolien ainsi que les retours d'expérience en mettant l'accent sur les précautions nécessaires à prendre lors de ce type de mesures et les résultats obtenus.

## 1 Introduction

A l'heure actuelle, la production d'électricité d'origine éolienne représente une des alternatives énergétiques, renouvelable et moins polluante que celle d'origine fossile. L'Europe s'étant doté de l'objectif 20-20-20 (20% de réduction des gaz à effet de serre, 20% de l'énergie consommée venant de sources renouvelables, augmentation de l'efficacité énergétique de 20%), depuis une quinzaine d'années, le nombre d'éoliennes installées en Europe ne cesse d'augmenter et ce, de manière spectaculaire. Le graphique de la Figure 1 montre l'évolution de la capacité européenne de production électrique d'énergie éolienne en quinze ans : de 5 000 MW en 1997, nous sommes passés au-delà des 100 000 MW en 2012.

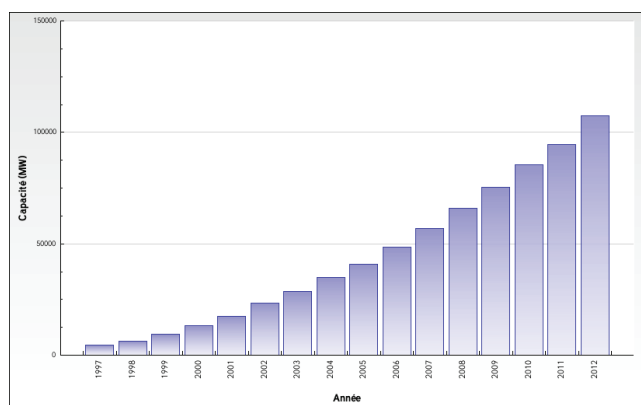


Figure 1 : Evolution de la capacité électrique européenne en MW d'origine éolienne [1]

De nombreuses critiques sont émises vis-à-vis de la construction et l'expansion des parcs éoliens : dévaluation des prix des terrains alentours, dangers pour la faune migratrice, perturbations électromagnétiques ainsi que gêne acoustique. Cette dernière est due à la perception du bruit émis par les éoliennes. Nous décrivons par la suite ses caractéristiques et la manière de le mesurer à l'immission. Pour comprendre les spécificités acoustiques de cette problématique, il est néanmoins important de comprendre ce qu'est une éolienne et la manière dont elle fonctionne.

## 2 Fonctionnement des éoliennes

Une éolienne est une unité de production électrique qui tire sa puissance des vents. La puissance mécanique extraite est donnée par

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p v_{vent}^3 \quad (1)$$

$\rho$  est la masse volumique de l'air,  $A$  l'aire balayée par les pales,  $C_p$  le coefficient de puissance de l'éolienne et  $v_{vent}$  la vitesse du vent. Plus l'aire balayée par les pales est grande, plus la puissance extraite sera importante. Ceci explique la grande taille des pales. Le coefficient de puissance dépend du type d'éolienne et de son fonctionnement spécifique. Ce sont les éoliennes tri pales à axe horizontal qui présentent le plus grand coefficient de puissance [2]. Enfin, la dépendance au cube de la vitesse du vent explique les choix, d'une part, du positionnement des parcs éoliens sur des crêtes ou sur des plateaux et, d'autre part, de l'utilisation de machines de haute taille ( $\sim 100$  m) comme illustrées à la Figure 2.

En effet, la vitesse du vent  $v_h$  à une hauteur  $h$  peut être modélisée par une loi de puissance à partir de la vitesse connue ou mesurée du vent  $v_{ref}$  à une hauteur  $h_{ref}$  :

$$v_h = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^m \quad (2)$$

Le coefficient  $m$  est le coefficient de cisaillement qui dépend de la stabilité ou non de la couche limite atmosphérique. D'après la référence [3], celui-ci varie de 0,09 (très instable) à 0,41 (très stable), la vitesse du vent augmentant avec l'altitude.



Figure 2 : Eolienne tri pale à axe horizontal de 2 MW

Ces remarques préliminaires liées au fonctionnement des éoliennes ont une importance quant à la production du bruit émis et à sa propagation dans leur voisinage.

La suite du document ne concerne que les éoliennes semblables à celle de la Figure 2 et qui sont installées dans les terres, les critiques étant majoritairement pointées vers ces dernières.

### 3 Le bruit éolien

Le bruit éolien, effet secondaire indésirable de la production électrique à partir du vent, peut être analysé de manière arbitraire en son émission, sa propagation, son immission et sa perception. Nous nous intéresserons principalement à ces deux dernières caractéristiques.

#### 3.1 Emission

Le bruit produit [4, 5] par les éoliennes provient, d'une part, des bruits d'origine mécanique naissant dans la nacelle (mouvements d'engrenages, du générateur) et, d'autre part, de ceux d'origine aérodynamique. Les nacelles actuelles étant en partie insonorisées et optimisées contre la production de bruits, les contributions principales sont celles d'origine aérodynamique. Elles se répartissent en trois groupes :

- Le bruit de turbulences du flux d'air est dû à l'interaction des pales avec les turbulences et vortex du vent qui vient sur l'éolienne. Bruit à large bande de par la grande variété des dimensions spatiales des turbulences, son importance dépend de la topographie, du parc installé et de la rugosité des pales.

- Le bruit de pale est lui-même issu de différentes contributions dont les deux principales sont le bruit de bord de fuite et le bruit de sommet des pales. Produits à partir de la couche limite turbulente qui se développe au niveau des pales, ils dépendent de la forme, de la finition et de l'orientation des pales. Si une pale est abîmée, d'autres mécanismes peuvent devenir dominants et mener à l'émission de tonalités.

- Le bruit de pertes de charges est une contribution qui est importante pour des éoliennes plus anciennes fonctionnant avec un vent qui frappe le mât avant d'atteindre les pales. Le bruit est dû aux accélérations et décélérations successives des pales qui évoluent dans le flux d'air perturbé par le mât. Ce mécanisme est moindre pour les éoliennes actuelles.

Le niveau de puissance global pondéré A, suivant le constructeur éolien et la vitesse de vent, tourne autour de 100 dB(A). Le bruit global émis est un bruit large bande avec des effets directifs et pouvant présenter une modulation en amplitude. Cette dernière n'est pas expliquée clairement par la communauté scientifique. Des tonalités peuvent être émises, soit par certaines contributions d'origine mécanique (limitées !), soit lorsqu'il y a des défauts au niveau des pales.

#### 3.2 Propagation

Le bruit émis se propage des hélices des éoliennes, placées en altitude, vers son « proche » environnement (~ 1 km) dans lequel des habitations peuvent être présentes, celles-ci souvent positionnées au-delà de quelques centaines de mètres (distance de sécurité minimale, recommandations internationales et législations nationales [6]) et à plusieurs dizaines de mètres en contrebas. Plusieurs phénomènes interviennent lors du trajet des ondes acoustiques [7].

La diminution de niveau de pression acoustique  $L_p$  de 6 dB par doublement distance à la source considérée comme ponctuelle et l'atténuation des plus hautes fréquences par absorption atmosphérique sont des phénomènes atténuants. L'effet de sol est à considérer car, même si celui-ci est

moins important pour des sources en hauteur, une différence de plus de 5 dB peut apparaître pour des sols de natures diverses [8]. Il y a peu d'autres éléments réfléchissants à prendre en compte, les éoliennes étant majoritairement en ligne de vue directe. Néanmoins, dans le cas contraire, il faut tenir compte des effets de diffraction sur les talus, de réflexions sur les murs d'habitations etc. Des phénomènes de réfraction causés par des gradients de température et de vitesse du vent ont lieu. Comme illustré à la Figure 3 extrait de l'ouvrage de S. Lévy [9], un gradient de vitesse de vent provoque une courbure des rayons acoustiques de telle sorte que peuvent apparaître des zones de silence ou, à l'inverse, des zones sur lesquelles sont rabattus les rayons. Les gradients peuvent avoir lieu de manière cyclique (passages jour/nuit où typiquement les rayons seront ramenés vers le bas par une inversion de température) ou, surtout dans le cas du vent, de manière plus rapide et différente suivant les endroits considérés ! Enfin, les turbulences présentes dans le flux d'air modifient le parcours des ondes acoustiques tel que, globalement, les endroits à faible  $L_p$  seront moins silencieux, les endroits à  $L_p$  importants n'étant que peu modifiés.

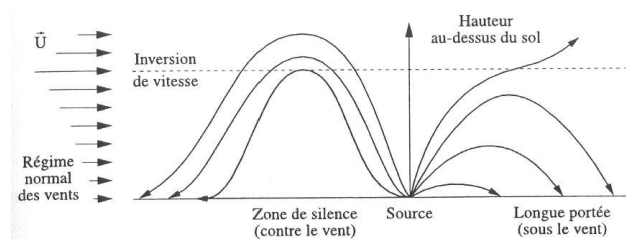


Figure 3 : Courbure des rayons acoustiques provenant d'une source au sol par un gradient de vitesse du vent [9]

#### 3.3 Immission

L'immission du bruit éolien, c'est-à-dire son impact aux endroits de réception susceptibles d'accueillir des personnes, dépend de l'émission et de la propagation du bruit, mais également de la manière de quantifier cet impact afin de prendre en compte les niveaux sonores, les aspects temporels et spectraux.

Les mesures à l'immission posent le problème de la seule détection du bruit éolien dans le bruit environnant. A plusieurs centaines de mètres, le niveau de ce bruit particulier est de l'ordre de 40 dB(A), niveau souvent proche du bruit de fond présent. Celui-ci est constitué des bruits de transports, d'animaux et du vent en interaction avec la flore ou tout autre obstacle. La vitesse du vent détermine donc les niveaux émis par les éoliennes ainsi qu'une partie du bruit de fond :

- A faible vitesse, les éoliennes ne tournent pas ou que très lentement. Le bruit de fond domine.

- Pour des vitesses comprises entre 4 et 8 m/s, le bruit éolien est prépondérant, les éoliennes approchant de leur fonctionnement optimal et les vitesses au sol n'étant pas trop importantes (cf. équation (2)) [10].

- Au-delà, les éoliennes ne tournent pas plus vite et la composante ventuse du bruit de fond ne cesse de croître jusqu'à dépasser puis masquer le bruit éolien [11].

Une autre conséquence de la présence de vent lors de mesures du bruit éolien est le bruit induit par l'interaction

du vent avec le sonomètre lui-même. L'utilisation de bonnettes de protection est nécessaire et, lorsque le vent devient trop important, une correction doit être appliquée afin de ne pas surestimer le bruit particulier [5,12].

En comparaison du bruit émis, celui à l'immission présente toujours un large spectre dont les hautes fréquences ont été préférentiellement atténuées et une modulation en amplitude mesurable. Plus de précisions sur les mesures à l'immission sont données au point 4.

La prédiction des niveaux sonores passant par la modélisation est réalisée par des méthodes de type « ingénieur » ou « scientifique » [13]. Ces dernières sont développées à partir des équations d'Euler (méthode FDTD) ou celles de la propagation des ondes (méthodes FFP, GFPE ou BEM). Elles permettent de prendre en compte nombre de phénomènes et sont parfois optimisées et combinées entre elles. Elles sont néanmoins longues à appliquer, demandent des ressources informatiques importantes et sont nombreuses (différents modèles pour différentes Universités). Les méthodes « ingénieurs » se basent souvent en bonne partie sur l'approximation des rayons acoustiques. Plus généralisées, basées sur des normes, ce sont celles proposées par les programmes d'acoustique du marché. Elles ne permettent pas de rendre compte de la spécificité des bruits reçus et leur utilisation peut s'avérer délicate à cause d'une grande sensibilité des résultats aux changements de paramètres [8]. Ces méthodes ne sont pas très adaptées au cas éolien, les effets de gradient étant mal pris en compte et les vitesses de vent limitées par les modèles sous-jacents ; remarque confirmée après discussion avec plusieurs sociétés d'expertise acoustique.

### 3.4 Perception

Les habitations situées à proximité des parcs sont touchées par le bruit éolien. Les habitants, vu les distances minimales de sécurité, seront soumis à des niveaux pondérés A  $L_{A,p}$  rarement supérieurs à 50 dB(A). Aucun effet pathologique direct n'est attendu, seule une gêne auditive peut se développer. Cette gêne est corrélée avec le niveau de bruit reçu, mais est également influencée par des facteurs non acoustiques comme des facteurs environnementaux (visuel ou non des éoliennes, voisinage) ou personnels (sensibilité au bruit, situation de travail ou de repos) [14]. Notons que beaucoup de ces facteurs ont été étudiés par la communauté scientifique et que très peu font l'unanimité [15].

La gêne causée dans le cas éolien peut avoir un impact sur la qualité de vie des gens et, entre autres effets, mener à des perturbations du sommeil et une souffrance psychologique [16].

La perception de ce bruit et la gêne peuvent être limitées par les bruits de la flore lorsque le vent est suffisant ou lorsqu'une route est également entendue [11, 17]. L'aménagement direct des habitations et les endroits précis d'installation des éoliennes ont une influence sur les conséquences négatives du bruit.

Des indicateurs de gêne sont tirés à partir de mesures faites à l'immission. Il en existe tout en panel, d'une mesure d'un niveau équivalent à la détermination d'indices psychoacoustiques [18] en passant par des approches originales mixtes [19]. Ils peuvent s'appliquer plus ou moins facilement au cas éolien et certains d'entre eux sont utilisés dans les réglementations nationales pour fixer des limites par rapport à l'installation de parcs éoliens. Remarquons que, d'une part, nombre de nouvelles réglementations et

normes nationales voient le jour afin de mieux prendre en compte le cas spécifique éolien et, d'autre part, quel que soit l'indicateur choisi, celui-ci passe par la *mesure* et qu'il ne couvre qu'une part des causes de la gêne liée au (bruit) éolien.

## 4 Mesures à l'immission

Les mesures réalisées près de parcs éoliens situés en Belgique dans la province du Hainaut ont pour but de préciser les bonnes pratiques de mesures, leur analyse et les résultats qui en découlent. Deux types de relevés, chacun avec ses avantages et ses défauts, ont été effectués : de « courte » durée et de « moyenne » durée.

### 4.1 Mesures de courte durée

Les mesures de courte durée (~ quelques heures) sont utiles pour caractériser spécifiquement le bruit éolien et le fonctionnement des éoliennes seconde après seconde. Elles peuvent aussi être nécessaires pour des mesures de contrôle concernant le respect des limites de bruit imposées par la réglementation en vigueur (cf. réglementation wallonne pour les établissements classés dont font partie les éoliennes [20]).

Lors de ces mesures, il est nécessaire de s'assurer que le bruit éolien sera effectivement bien mesuré ; c'est-à-dire de se positionner préférentiellement dans la direction et le sens vent-éolienne-appareils de mesure (vent portant le bruit éolien vers le point de mesure), dans un environnement calme afin de minimiser le bruit de fond et un jour de vent respectant les conditions optimales discutées au point 3.3. Ces conditions restreignent fortement les moments et les endroits où les mesures peuvent être réalisées.

En juillet 2013, une mesure a été effectuée dans ces conditions aux abords du parc éolien de Dour-Quévrain situé dans le sud-ouest de la Belgique à quelques kilomètres de la frontière française. Un sonomètre de classe 1 ainsi qu'une station météorologique ont été installés en un lieu situé à 340, 440 et 860 m respectivement des trois éoliennes les plus proches (photo Figure 4).



Figure 4 : Matériel près du parc éolien de Dour-Quévrain

Les données enregistrées par le sonomètre, la station météorologique et celles provenant des éoliennes qui nous

avaient été renseignées, sont analysées individuellement puis séparément. Les données éoliennes (tours par minutes, vitesses de vent, orientations) sont fournies toutes les dix minutes, c'est pourquoi la majorité des analyses sont effectuées avec un échantillonnage de dix minutes.

Avec l'analyse audio, nous remarquons la présence du bruit éolien, mais un bruit de fond important est toujours présent : bruit du vent dans des arbustes et les champs, chants d'oiseaux et bruits d'avion occasionnellement. Le passage d'un avion au-dessus de l'endroit de mesure, même sur dix minutes, augmente sensiblement le niveau de pression acoustique. Ce passage nécessite d'être mis de côté. Les oiseaux peuvent influencer le niveau sur dix minutes s'ils se manifestent trop souvent (lever du Soleil, journées ensoleillées) mais leur chant est reconnaissable : évolution temporelle de  $L_{A,p}$  avec de fins pics et présence d'une composante importante à 3,5 kHz dans le spectre de bande de tiers d'octave. Toujours présente dans le spectre et augmentant avec la vitesse du vent, une composante est issue du bruit du vent dans la végétation. Le spectre pondéré A de ce bruit seul est très large comme le montre la Figure 5. Notons que le niveau centile 90 pondéré A  $L_{A,90}$  et le niveau équivalent pondéré A  $L_{A,eq}$  sur dix minutes évoluent peu et restent écartés de l'ordre de 3 dB(A) : le bruit global montre une certaine dynamique mais n'évolue pas dans sa nature sur la durée totale de la mesure.

Le bruit éolien, au vu des différentes conditions nécessaires pour être mesuré et les contraintes liées au bruit de fond, est difficile à mettre en évidence. Le spectre pondéré A, avec un minimum de bruit de végétation, est assez large avec un maximum vers 400 ou 500 Hz comme le montre le graphe du dessus de la Figure 6. Signature temporelle caractéristique, la modulation en amplitude du  $L_{A,p}$  n'est toutefois visible qu'occasionnellement lors des analyses (graphique inférieur de la Figure 6).

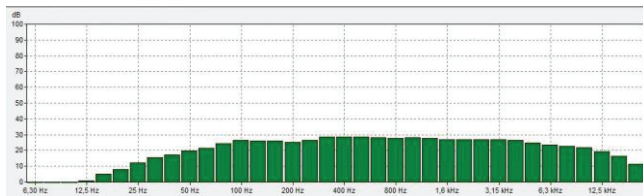


Figure 5 : Spectre pondéré A (de 6,3 Hz à 20 kHz) du bruit du vent dans la végétation

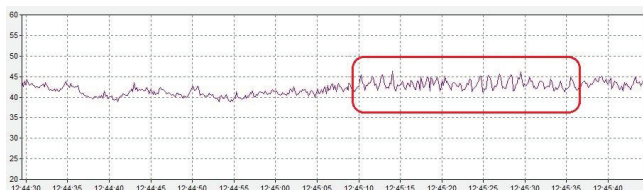
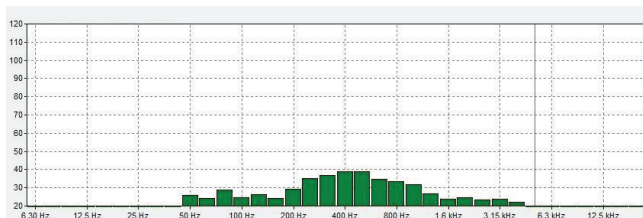


Figure 6 : Spectre pondéré A (de 6,3 Hz à 20 kHz) du bruit éolien à partir de 20 dB(A) (*dessus*). Evolution temporelle de  $L_{A,p}$  en fonction du temps (*dessous*) ; l'encadré rouge met en évidence la modulation en amplitude (~ 30 s)

Les données de la station météorologique nous apprennent qu'une vitesse moyenne sur 10 minutes de 5 m/s n'est jamais dépassée ( $v_{vent} = (3,6 \pm 0,2)$  m/s), nous assurant de la très faible influence du bruit de l'équipement induit par le vent sur les mesures. Néanmoins, seconde après seconde, le vent présente des rafales et des accalmies telles qu'une dispersion importante des niveaux sonores est mesurée. Cela se traduit, pour chaque ensemble de 10 minutes considéré, par une corrélation positive mais de moyenne valeur entre la vitesse du vent et le niveau sonore mesuré. Pour illustrer ce propos, la Figure 7 montre le niveau sonore équivalent en fonction de la vitesse de vent toutes les deux secondes. Le coefficient de corrélation  $r = 0,46$ .

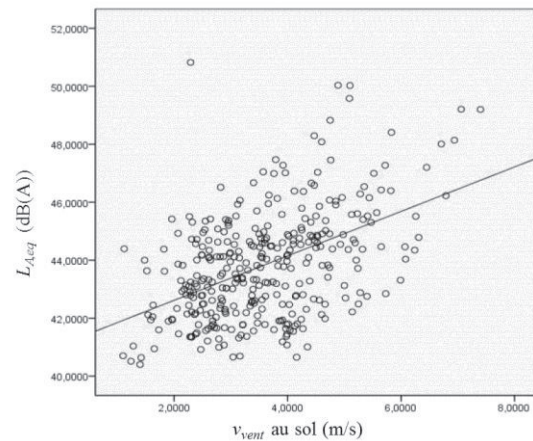


Figure 7 : Niveau sonore équivalent pondéré A en fonction de la vitesse du vent mesuré par la station météorologique

Le calcul des coefficients de corrélation de Spearman nous indique quelles éoliennes influencent les niveaux sonores (c'est-à-dire quelles éoliennes sont entendues à l'endroit de réception) et sur les variations spatiales du vent.

Vis-à-vis des paramètres fournis par les éoliennes (orientation de la nacelle, vitesses moyenne/min/max et nombre de tours par minute moyen/min/max toutes les dix minutes), les niveaux mesurés sont corrélés avec les paramètres des deux éoliennes les plus proches et ce, de manière significative voire hautement significative par tests sur les coefficients calculés. Même si les coefficients de corrélation ne permettent pas de conclure à des liens de causes à effets entre deux grandeurs corrélées, la présence de la troisième éolienne ne modifie pas les niveaux sonores mesurés.

Si le même exercice de calcul de corrélations sur les échantillons de dix minutes est effectué entre les données des trois éoliennes et celles de la station météorologique au sol, nous nous rendons compte qu'il existe une grande variabilité spatiale des vents : très peu de corrélations entre la station météorologique et les éoliennes d'une part et des corrélations existantes surtout entre éoliennes *directement* voisines d'autre part.

## 4.2 Mesures de moyenne durée

Les mesures de moyenne durée (~ quelques semaines) sont utiles pour caractériser l'environnement sonore d'un endroit particulier. Elles sont intéressantes avant et après installation d'un parc éolien pour mesurer l'impact sonore

des éoliennes. Les mesures réalisées peuvent aussi être utiles pour le contrôle du respect des limites de bruit imposées comme les mesures courtes durées, mais cette approche permet de tirer des résultats plus généralisables.

Lors de ces mesures, l'enregistrement se fait à un endroit de réception privilégié, c'est-à-dire proche d'une habitation où des personnes peuvent être gênées. Afin de sécuriser le matériel et après accord des propriétaires, un jardin dégagé (limitation du bruit de végétation et des effets de diffraction ou de réflexion) est l'idéal. Il est indispensable de prévoir l'alimentation électrique (par câble ou batteries échangeables) et la récupération régulière des données afin de vider les cartes mémoires avant saturation. Afin de limiter l'utilisation de la mémoire, les enregistrements audio sont réalisés jusqu'à 12 kHz avec une résolution de 8 bits. Enfin, le sonomètre doit être équipé d'un « kit extérieur » et suffisamment bien arrimé pour éviter tout dégât que pourraient causer la pluie ou les grands vents.

De décembre 2013 à janvier 2014, le matériel de mesure a été installé dans un quartier voisin du parc éolien de Tourpes-Thumaide (en Belgique non loin de la frontière française) et dans lequel nombre de personnes se plaignent du bruit engendré par les éoliennes. Il apparaît après discussion que le bruit est perçu à l'intérieur même de plusieurs habitations. Les résultats et conclusions qui suivent sont tirés d'une première phase d'analyse, le traitement des données étant toujours en cours.

Du point de mesure, les neuf éoliennes de 2 MW du parc sont situées entre 850 et 1520 m. Il n'y a pas de variation de relief et peu de végétation est présente directement autour du sonomètre. Les enregistrements se sont étalés sur 25 jours consécutifs. La Figure 8 montre l'évolution, par tranches de dix minutes, du  $L_{A,eq}$  (en bleu) et du  $L_{A,90}$  (en vert) pour une journée où les éoliennes tournent. De 6 H 00 à 23 H 00, les passages de trains sur une ligne située entre le parc éolien et le village influencent de manière non négligeable et régulièrement le niveau équivalent. D'autres événements interviennent et les moments utiles pour l'analyse du bruit éolien sont filtrés sur les périodes de 10 minutes en plusieurs étapes :

- Mise à l'écart des périodes avec passages de trains ou d'avions proches. Comme montré sur la Figure 8, le  $L_{A,eq}$  dépassent les 50 dB(A).
- Mise à l'écart des périodes perturbées lors de grands vents (> 5 m/s) durant lesquelles le bruit induit par le vent (végétation, équipement) est dominant et les éoliennes non perçues.
- Mise à l'écart des moments de fortes pluies, les niveaux sonores en étant grandement perturbés sur toutes les bandes d'octave.
- Application d'une correction globale due au bruit induit par le vent sur le sonomètre (cf. [12]) lorsque celle-ci n'est pas inférieure au  $L_{A,eq} - 10$  dB(A).

Ces critères peuvent être appliqués de façon automatique. Néanmoins, en pleine journée principalement, une écoute des enregistrements et une observation des niveaux sonores par sondage sur les échantillons nous indiquent la présence aléatoire de bruits de voitures, de voisinage, d'animaux, etc. tels que le niveau sonore peut être surévalué s'ils sont pris en compte.

Au final, sur les 3458 périodes de 10 minutes, il n'en reste que 494 (~ 14 %) pour lesquelles certaines ont vu leur

niveau corrigé de manière globale, d'autres ne présentent un bruit éolien que peu perceptible ou sont marquées par un bruit routier diffus venant de grandes routes éloignées.

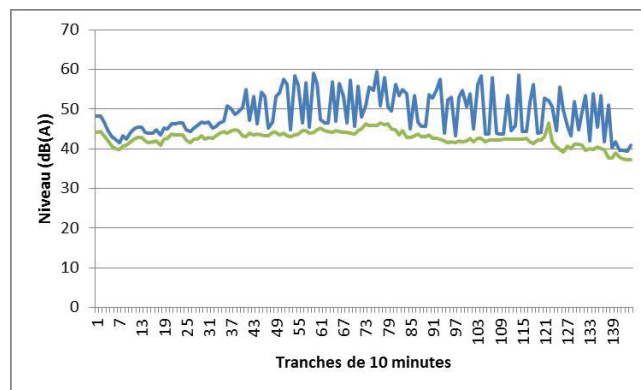


Figure 8 : Evolution du  $L_{A,eq}$  (en bleu) et du  $L_{A,90}$  (en vert) déterminés sur 10 minutes au cours d'une journée type

Il ressort que le bruit éolien est perceptible principalement en pleine nuit ce qui s'explique par un bruit de fond moindre (moins d'activités humaines ou animales) et des conditions atmosphériques telles que la propagation acoustique est favorisée vers le bas (cf. partie 3.2). Les moments où le bruit éolien est une des contributions principales au bruit global sont caractérisés par un spectre dont la contribution la plus importante se situe autour de 400 et 500 Hz. Du point de vue de la dynamique temporelle, le bruit résultant ne varie que faiblement sur des périodes pouvant s'étaler sur plusieurs heures (voir première partie de la Figure 8), même pour des périodes d'évaluation plus fines. L'arrivée de la nuit ne s'accompagne dès lors plus d'une baisse significative du bruit ambiant que les habitants sont en droit d'attendre dans un village, mais d'un bruit constant apparenté à un avion lointain. En effet, cette comparaison faite par des habitants est corroborée par des spectres, mesurés lors du passage d'avion, avec une contribution majoritaire dans les mêmes bandes de fréquence que le bruit éolien.

Enfin, la modulation en amplitude est une caractéristique temporelle parfois présente. Cette particularité est obsédante et est difficilement négligeable une fois perçue. A l'inverse de bruits à caractères impulsifs ou comportant une tonalité, cette sorte de bruit n'est généralement pas prise en compte dans les législations (par exemple, voir [20]).

## 5 Perspectives

Le bruit émis par les éoliennes est une des principales critiques négatives qui leur sont attribuées et mises en avant par ses détracteurs. De plus, les prévisions faites à l'aide des logiciels actuels ne fournissent pas de résultats suffisamment fiables de par les difficultés posées principalement par les gradients de vitesse de vent. Que ce soit pour l'amélioration des logiciels (modélisation), pour vérifier le respect des limites de bruit (expertise) ou pour comprendre pourquoi ce bruit apporte autant de gêne (psychoacoustique), des mesures sont nécessaires. Celles-ci nécessitent beaucoup de précautions et, dans le cadre de mesures de moyenne et longue durées, un traitement de données fastidieux. Dans ce cadre, La détection du bruit

éolien et l'évaluation de son impact spécifique sont deux thèmes dont il est nécessaire de se préoccuper.

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidées dans mon travail, qu'elles soient issues de l'Université de Mons ou aides extérieures. Pensées particulières à tout le Service de Physique Générale ainsi qu'à l'ensemble de mes amis.

## Références

- [1] [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net)
- [2] M. Rapin and P. Leconte, *Eoliennes*, **BM4 640v2**. Ed. Techniques de l'Ingénieur.
- [3] G. P. van den Berg. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, **277**, 955 – 970 (2004).
- [4] S. Wagner, R. Bareiß, and G. Guidati. *Wind Turbine Noise*. Springer (1996).
- [5] D. Bowdler and G. Leventhall (editors). *Wind Turbine Noise*. Multi-Science Publication (2011).
- [6] PREDAC – European Actions of Renewable Energies. *La programmation spatiale des projets éoliens*. Guide méthodologique & comparaison d'expériences européennes.
- [7] E. M. Salomons. *Computational atmospheric acoustics*. Kluwer Academic Publishers (2001).
- [8] C. E. Tickell, J. T. Ellis and M. Bastasch. Wind turbine generator noise prediction - comparison of computer models. In *Proceedings of ACOUSTICS 2004*.
- [9] S. Léwy. *Acoustique industrielle et aéroacoustique*. Hermès Science Publications (2001).
- [10] E. A. King, F. Pilla and J. Mahon. Assessing noise from wind farm developments in Ireland : A consideration of critical wind speeds and turbine choice. *Energy Policy*, **41**, 548 – 560 (2012).
- [11] K. Bolin. Wind Turbine Noise and Natural Sounds - Masking, Propagation and Modeling. PhD thesis, KTH Engineering Sciences (2009).
- [12] J. Cooper, D. Leclercq and M. Stead. Wind induced aerodynamic noise on microphones from atmospheric measurements. In *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics* (2010).
- [13] W. Probst. New techniques in noise prediction. In *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics* (2010).
- [14] L. D. Knopper and C. A. Ollson. Health effects and wind turbines : A review in the literature. *Environmental Health*, **10**, 78 (2011).
- [15] C. Marquis-Favre and E. Premat, Noise and its effects - A review on Qualitative Aspects of Sound. Part II : Noise and Annoyance. *Acta Acustica united with Acustica*, **91**, 626 – 642 (2005).
- [16] R. H. Bakker, E. Pedersen, G. P. van den Berg, R. E. Stewart, W. Lok and J. Bouma. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of the Total Environment*, **425**, 42 – 51 (2012).
- [17] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker and J. Bouma. Can road traffic mask sound from wind turbines ? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound. *Energy Policy*, **38**, 2520 – 2527 (2010).
- [18] C. Marquis-Favre and E. Premat, Noise and its effects - A review on Qualitative Aspects of Sound. Part I : Notions and Acoustic Ratings. *Acta Acustica united with Acustica*, **91**, 613 – 625 (2005).
- [19] B. De Coensel and D. Botteldooren. The Quiet Rural Soundscape and How to characterize it. *Acta Acustica united with Acustica*, **92**, 887 – 897 (2006).
- [20] 4 JUILLET 2002 - *Arrêté du Gouvernement wallon fixant les conditions générales d'exploitation des établissements visés par le décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement*.