

CFA/VISHNO 2016

Bruit Eolien à l'Immission : Retour d'Expérience

B. Fauville et F. Moïny
UMons, 20, Place du Parc, 7000 Mons, Belgique
benoit.fauville@umons.ac.be



LE MANS

Le développement des parcs éoliens s'est accentué depuis une quinzaine d'années avec pour objectifs de diversifier les moyens de production électrique et d'utiliser des sources d'énergie renouvelables. Ce développement est souvent critiqué par les habitants voisins des parcs, ceux-ci redoutant notamment le bruit émis par les éoliennes en fonctionnement. Au-delà de plusieurs centaines de mètres, le bruit perçu est principalement d'origine aérodynamique, variant avec la vitesse du vent, son orientation et ses gradients. Afin de rendre compte de l'impact d'un parc au voisinage d'habitations (bruit à l'immission), des mesures ont été effectuées durant deux semaines autour de l'éolienne isolée du domaine provincial namurois de Chevetogne en Belgique. Deux sonomètres, dont un accompagné d'une station météorologique, ont été placés à environ 150 m de l'éolienne, enregistrant le bruit émis dans des directions orthogonales. L'analyse présentée met en évidence les points communs et les différences entre les résultats obtenus aux deux points de mesure. Une attention particulière est portée sur la modulation en amplitude, caractéristique du bruit éolien.

1 Introduction

Parce qu'elles représentent une source d'énergie verte et renouvelable et qu'il existe une réelle volonté politique de diversifier les moyens de production d'électricité, les éoliennes sont de plus en plus nombreuses dans le paysage européen. En effet, entre les années 2000 et 2015, la capacité électrique totale installée en Union Européenne est passée de 12,9 GW à 141,6 GW. De plus, la capacité annuelle croît régulièrement, quadruplant les 3,2 GW de l'an 2000 pour arriver aux 12,8 GW de 2015 [1].

L'installation d'éoliennes on-shore ne se fait pas sans certaines critiques dont la dévaluation des prix de l'immobilier alentour, l'impact visuel et la gêne sonore. Ces arguments sont souvent repris par des associations luttant contre l'installation de nouveaux parcs (exemple en Belgique, voir le site [2]).

Le bruit éolien est dû à différents mécanismes et peut être entendu à plus d'un kilomètre de distance pour des éoliennes modernes de puissance supérieure au MW. Afin d'objectiver ces rendus, mais également dans le cadre du suivi de l'installation d'une éolienne et de sa conformité aux limites acoustiques en vigueur, il est nécessaire de savoir mesurer ce bruit. De plus, la mesure est une étape nécessaire dans la validation de méthodes de modélisation pour la prévision du bruit à l'immission. Nous nous proposons ici de mettre en avant les caractéristiques du bruit éolien mesuré à une centaine de mètres d'une éolienne isolée à l'aide de deux sonomètres placés dans des directions orthogonales.

2 Bruit éolien

Quelles sont les différentes composantes du bruit émis par une éolienne en fonctionnement ? Certaines, présentant des tonalités, sont générées à l'intérieur de l'éolienne (éléments mécaniques, transformateurs) mais sont maîtrisées et limitées pour les éoliennes modernes [3]. Les composantes d'origine aérodynamique sont dominantes, d'autant plus à grande distance, c'est-à-dire à plusieurs centaines de mètres, au niveau d'habitations voisines du parc éolien. Les mécanismes de production du bruit sont nombreux et dépendent de facteurs qui découlent autant de la fabrication de l'éolienne (taille, type de mât, forme des pales) que des conditions météorologiques (vitesse et orientation du vent, gradients de température et de vitesse du vent, turbulences). Dans le cas d'éoliennes modernes à axe horizontal, s'orientant de manière à présenter les pales face au vent, trois mécanismes dominant :

- le bruit de bord de fuite (*trailing edge noise*),

- le bruit de turbulence du flux incident (*inflow turbulence noise*),
- le bruit d'extrémité (*tip noise*).

Mesuré par un réseau de microphones, Oerlemans *et al.* [3] ont montré que le bruit était émis principalement lors du mouvement descendant de la pale pour un observateur situé au sol. La Figure 1 montre cette directivité par la disposition des sources de bruit moyennée sur plusieurs rotations pour une éolienne de 2,3 MW.



Figure 1 : Emission du bruit éolien mesuré par un réseau de microphones placé au sol [3]

Une conséquence de cette directivité est la modulation en amplitude. Cette dernière est une caractéristique souvent étudiée car souvent décrite par les riverains voisins de parcs éoliens (« pulsation », « bruit de balayage », etc.) mais aussi parce que ce qu'elle peut s'amplifier de manière inhabituelle. Différents phénomènes peuvent expliquer cette augmentation de la modulation qui peut atteindre plus de 10 dB(A) : présence de forts gradients de vitesse de vent en conditions nocturnes, variation de l'angle d'attaque des pales lors de leur mouvement ou encore synchronisation occasionnelle de plusieurs éoliennes [5, 6]. Actuellement, des recherches sont toujours en cours pour mieux comprendre cette modulation.

Une manière aisée de caractériser l'amplitude de la modulation après mesure avec un sonomètre est décrite par Tachibana [7]. Les enregistrements sont découpés en périodes de trois minutes. Pour les périodes qui présentent un bruit éolien prépondérant, la différence entre les niveaux pondérés A avec une pondération temporelle Fast ($\tau = 125$

ms) et une pondération temporelle Slow ($\tau = 1$ s) est calculée à tout instant t :

$$\Delta L_A(t) = L_{A,F}(t) - L_{A,S}(t).$$

A partir de ses niveaux percentiles 5 et 95, la profondeur de modulation en amplitude est définie comme

$$D_{AM} = \Delta L_{A,5} - \Delta L_{A,95}.$$

Les premiers tests d'audition montrent que le caractère modulé n'est perçu qu'au-dessus d'un $D_{AM} = 1,7$ dB(A). Nous avons utilisé cette méthode pour décrire la profondeur de modulation mais appliquée à des périodes d'une minute comme montré sur l'exemple de la Figure 2.

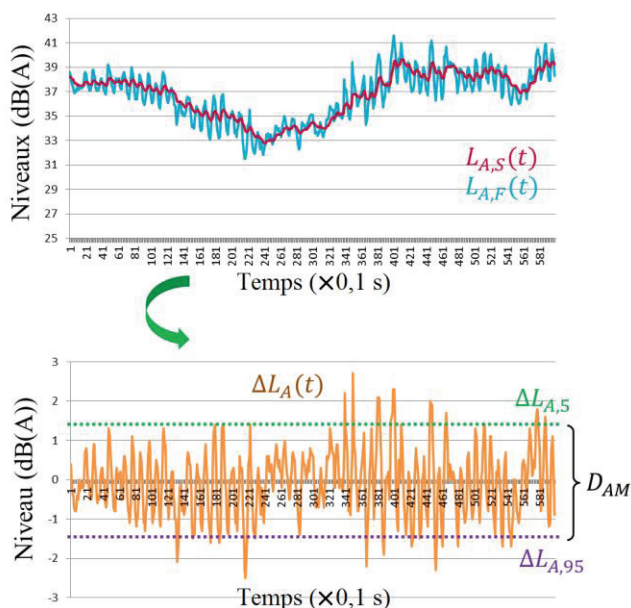


Figure 2 : Illustration de la détermination de la profondeur de modulation en amplitude en deux étapes ; calcul du $\Delta L_A(t)$ et évaluation statistique de ses percentiles 5 et 95. Le D_{AM} résultant est de 2,8 dB(A)

La profondeur de modulation n'étant qu'un seul paramètre pour décrire la modulation en amplitude, il serait intéressant d'élargir les observations au rythme de cette variation au cours du temps. Pour cela, il est nécessaire d'extraire une valeur de fluctuation sur la période de travail considérée. Comme l'ont montré Evans et Cooper [12], il n'est pas si aisé de tirer cette information, la modulation ne ressemblant pas à une sinusoïde régulière et des bruits parasites pouvant affecter la valeur calculée.

Nous avons utilisé une toolbox gratuite de Matlab (*MIRtoolbox 1.6.1*) qui a pour but d'extraire des caractéristiques musicales de fichiers audio [13]. Une méthode implantée permet d'obtenir une estimation du rythme à partir d'un spectrogramme évalué sur une décomposition en bandes de fréquences de type Bark, Mel ou définies par l'utilisateur. La fonction employée ici est *mirfluctuation('fichier_audio','Summary')*. Cette fonction permet d'identifier des fluctuations dont la fréquence est comprise entre 0 Hz et 10 Hz, ce qui correspond à la gamme de valeurs attendues pour une éolienne de grande taille.

3 Campagne de mesure

3.1 Domaine de Chevetogne

Les résultats présentés ci-dessous ont été tirés d'une campagne de mesure réalisée dans le domaine de Chevetogne situé dans la province de Namur (Belgique) à 60 km au Nord de Charleville-Mézières. A l'entrée du domaine est installée une éolienne à axe horizontal dont le moyeu est situé à 75 m de haut et dont la longueur des pales est de 24 m. La puissance nominale est de 800 kW [8].

L'éolienne est construite au milieu de prairies, dans un endroit situé en hauteur par rapport au reste du domaine. A une centaine de mètres, on note la présence d'une petite zone boisée. Une route menant de l'entrée du domaine aux installations proposées aux visiteurs serpente et passe près de l'éolienne.

Le matériel a été déposé pendant deux semaines début juillet en deux endroits autour de l'éolienne comme montré sur la Figure 3. Les points 1 et 2 sont éloignés respectivement de 175 m et 105 m du mât. L'angle entre les directions des droites reliant les points de mesure au centre de l'éolienne est de 85° . Un premier sonomètre et une station météorologique ont été placés au point 1, le second sonomètre au point 2.

3.2 Matériel

Station météorologique

La station météorologique est une MetPak Pro de chez Gill Instruments montée sur pied à une hauteur de 2,2 m et alimentée par batterie. La vitesse du vent, son orientation, la température, la pression atmosphérique et l'humidité ont été enregistrés sous forme de fichiers textes toutes les 2 secondes.

Sonomètres

Les deux sonomètres sont des Nor140 de Norsonic, instrument de classe 1 selon la norme IEC 61672-1 [9]. Ils ont été installés à une hauteur de 1,5 m, munis de leur kit extérieur et branchés sur batteries. Nous les avons calibrés avant les mesures et nous avons vérifié l'absence de dérive au terme de celles-ci.

Les sonomètres ont été placés de manière à être éloignés des routes pour diminuer au maximum l'influence des passages des visiteurs et des voitures. Nous nous sommes également écartés des plus proches arbres afin d'enregistrer le moins possible de bruits générés par le vent dans les branches. Une contrainte supplémentaire nous privait de l'accès à certaines zones entourant l'éolienne qui étaient réservées à des pâturages.

Les niveaux continus équivalents, avec ou sans pondération temporelle, pondérés A ou Z, ont été mesurés avec une période d'intégration $T = 100$ ms. Par exemple, $L_{A,eq}$ représente le niveau continu équivalent sur 100 ms pondéré A et sans pondération temporelle. Les niveaux statistiques sont également mesurés et une décomposition en bande de tiers d'octave est accessible. Un enregistrement audio (12 kHz codé sur 8 bits) permet une réécoute des événements survenus tout au long des deux semaines.

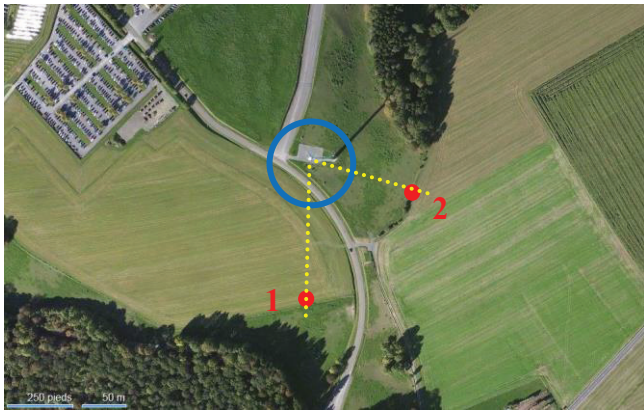


Figure 3 : Eolienne de Chevetogne (cercle bleu) et les points de mesure 1 et 2 (cercle rouge)

4 Résultats

4.1 Ambiance sonore

Les journées sont marquées par de réguliers passages de véhicules se rendant dans le domaine, par l'utilisation de machines d'entretiens ainsi que par la présence d'une faune variée dont des chevaux, des insectes et des oiseaux qui se font entendre notamment lors du chœur matinal [10]. L'éolienne est perceptible lorsque le vent souffle mais les nombreuses sources de bruit résiduel, c'est-à-dire toutes sauf l'éolienne, permettent difficilement d'avoir un bruit éolien isolé, ou du moins dominant.

Durant les nuits d'activité normale, l'accès au domaine est fermé. Ces nuits peuvent dès lors présenter de longs moments pendant lesquels l'éolienne est clairement perceptible et dominante, d'autant que les oiseaux se font entendre plutôt en début qu'en pleine nuit.

Les conditions météorologiques vont influencer grandement l'ambiance sonore. Celles-ci étaient variables, alternant des passages secs et ensoleillés avec d'autres pluvieux et plus froids, en présence de vent ou non. Un vent trop fort augmentera sensiblement le bruit résiduel dû au bruit de végétation (interaction du flux d'air avec les branches et feuilles de la végétation) et celui d'interaction du vent avec le microphone qui ne peut plus être négligé malgré la présence d'une bonnette anti-vent. Le spectre résultant de cette situation est très large et semblable à un bruit blanc. La pluie, lorsqu'elle devient intense, augmente surtout le niveau sonore dans les bandes de hautes fréquences à cause de l'impact des gouttes d'eau avec toute surface située aux alentours des sonomètres, dont la boîte contenant la batterie.

Parmi l'ensemble de ces sons, celui de l'éolienne est celui qui nous intéresse particulièrement.

4.2 Bruit éolien

Le but de cette campagne était d'étudier les variations du bruit à l'immission en fonction des paramètres météorologiques et la modulation en amplitude. Nous ne voulions pas mesurer quantitativement l'impact sonore de l'éolienne au cours du temps, le matériel n'étant pas installé à proximité d'une habitation ou à une distance comparable.

Pour ce faire, nous avons isolé les périodes temporelles où les deux sonomètres présentaient des enregistrements dominés par le bruit éolien. A noter, d'une part, que les

moments pendant lesquels la nacelle est en rotation n'ont pas été retenus car ce mouvement ne génère pas une composante importante du bruit éolien sauf dans les cas où le niveau sonore est faible dû à un faible vent ; d'autre part, que nous avons travaillé avec des grandeurs acoustiques pondérées A par simple facilité de détection. Le travail d'analyse a été effectué sur des périodes temporelles d'une minute.

Nous avons utilisés certains critères fixes permettant une sélection d'intervalles à écarter dans ces périodes d'une minute. Cette sélection est implantée de façon **automatique**.

- $L_{A,eq} \leq 27$ dB(A) : le niveau sonore dans un endroit isolé peut descendre très bas en l'absence de vent et tendre vers les limites inférieures de conformité de l'appareil.
- $L_{A,eq} \geq 55$ dB(A) : les éléments sonores intenses sont rejetés (cris, voiture proche, oiseau à côté du micro).
- $L_{A,eq,3.15kHz} \geq 30$ dB(A) : critère basé sur la bande fréquentielle centrée sur 3,15 kHz afin d'éliminer une partie des oiseaux fortement présents en été.

Ensuite, seuls les périodes conservant plus de 45 s de données à analyser ont été retenues.

Ces critères permettent une première sélection des périodes qui nous intéressent mais une révision « manuelle » est néanmoins nécessaire, des événements extérieurs pouvant avoir un niveau sonore comparable à celui produit par l'éolienne [11]. De plus, nous n'avons gardé que les périodes durant lesquelles l'éolienne était perceptible simultanément pour les enregistrements provenant des deux sonomètres.

Qu'en est-il du bruit éolien à proprement parler ? Nous constatons une grande dynamique du bruit éolien. Ce dernier, à courte distance d'une éolienne isolée, peut présenter un caractère fluctuant important en plus de la modulation en amplitude comme le montre la Figure 4. Sur deux minutes, les niveaux continus équivalents ($T = 100$ ms) varient sur une gamme de 10 dB(A), modulation exclue. A noter que cette dernière n'est pas constante tant dans sa profondeur que dans son rythme. Ce cas n'est pas isolé et, de manière globale, la signature acoustique de l'éolienne n'est pas univoque :

- niveaux globaux stables sur plusieurs dizaines de minutes ou non ;
- modulation marquée ou non, pour l'une ou les deux positions;
- séparation parallèle de ces niveaux de plusieurs décibels ou niveaux confondus.

Il est dès lors difficile de poser un constat général dans un premier temps.

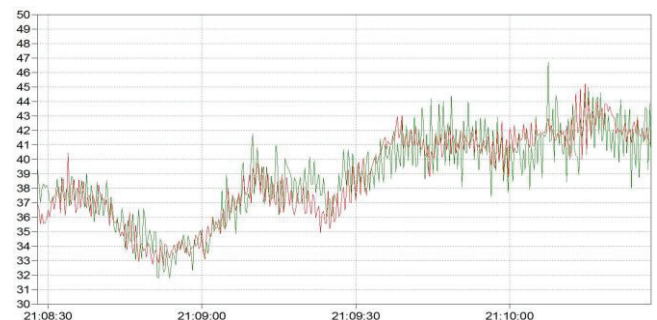


Figure 4 : Exemple de $L_{A,eq}$ (dB(A)) mesurés aux points de mesure 1 et 2 pendant deux minutes

Concernant le spectre du bruit émis par l'éolienne, celui-ci est assez large et présente des variations lorsque les deux enregistrements sont analysés simultanément en bandes de tiers d'octave. Néanmoins, certaines fréquences dominent comme le montre les différences entre le niveau global ($L_{A,eq,1min}$) et les niveaux par bandes de tiers d'octave ($L_{A,eq,1min,Xi}$ Hz). La Figure 5 présente le résultat moyenné pour l'ensemble des périodes d'une minute sélectionnées. Nous obtenons deux courbes (les deux sonomètres) qui s'approchent de 0 dB(A) aux bandes centrées sur les fréquences 315 Hz, 400 Hz et 500 Hz. Cela traduit le fait que ces bandes sont les principales à influencer le niveau global en ce qui concerne le bruit éolien.

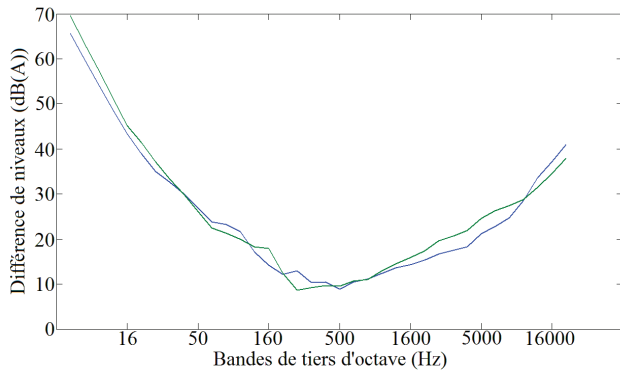


Figure 5 : Différences en dB(A) entre le niveau global et celui de chaque bande de tiers d'octave pour les deux enregistrements

4.3 Modulation en amplitude

Dans cette section, nous nous intéressons plus particulièrement à la modulation en amplitude caractérisée dans un premier temps par sa profondeur de modulation. Elle est calculée comme expliqué précédemment, c'est-à-dire par la méthode de Tachibana sur les périodes de une minute sélectionnées.

Malgré une grande variabilité, la modulation en amplitude que nous avons pu mesurer montre certaines caractéristiques lorsque nous rassemblons l'ensemble des résultats de la campagne de mesure.

Si nous nous intéressons au niveau continu équivalent sur une minute ($L_{A,eq,1min}$) en fonction de la profondeur de modulation (D_{AM}), nous pouvons observer pour les deux sonomètres un nuage de points dissymétrique comme montré à la Figure 6 pour un des points de mesure. Nous avons une large gamme de niveaux pour une faible modulation ; cette gamme se rétrécit et des niveaux plus élevés sont observés pour une amplitude plus importante.

Une autre tendance apparaît lorsque l'on compare la différence de $L_{A,eq,1min}$ entre le sonomètre du point 2 et celui du point 1 (cf. Figure 3) en fonction de celle pour la D_{AM} calculée sur les mêmes périodes : si la modulation en amplitude est plus marquée pour l'une des positions, alors le niveau équivalent sera plus élevé pour l'autre comme nous le remarquons sur les quadrants 2 et 4 de la Figure 7. Nous pouvons néanmoins observer dans certains cas que des niveaux équivalents plus élevés pour le sonomètre 2 apparaissent avec une modulation plus grande (quadrant 1). Cela peut s'expliquer par le fait que le second point de mesure est plus proche de l'éolienne que le premier.

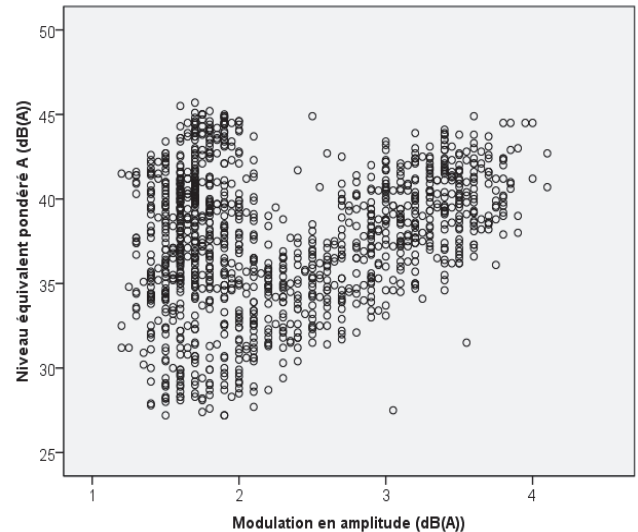


Figure 6 : Niveau continu équivalent sur une minute mesuré en un point de mesure en fonction de la profondeur de modulation en amplitude

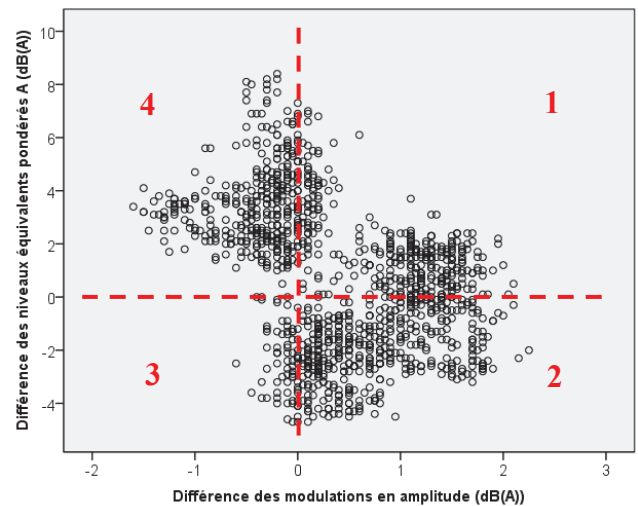


Figure 7 : Différence de niveau continu équivalent mesuré par les deux sonomètres en fonction de la différence de profondeur de modulation sur les périodes correspondantes

Par ailleurs, nous avons représenté sur la Figure 8 les moyennes de différence de profondeur de modulation sur l'ensemble des périodes retenues en fonction de l'orientation du vent par pas de 30°. Sachant que l'éolienne s'oriente automatiquement pour être face au vent, la modulation en amplitude est plus importante pour le sonomètre 2 à 210° et pour le sonomètre 1 à 300°, ce qui correspond dans les deux cas à un vent de côté. Cette différence est la signature d'un bruit de bord de fuite prépondérant [3]. Pour nos enregistrements, il n'y pas eu de périodes sélectionnées avec un vent compris entre 15° et 165°.

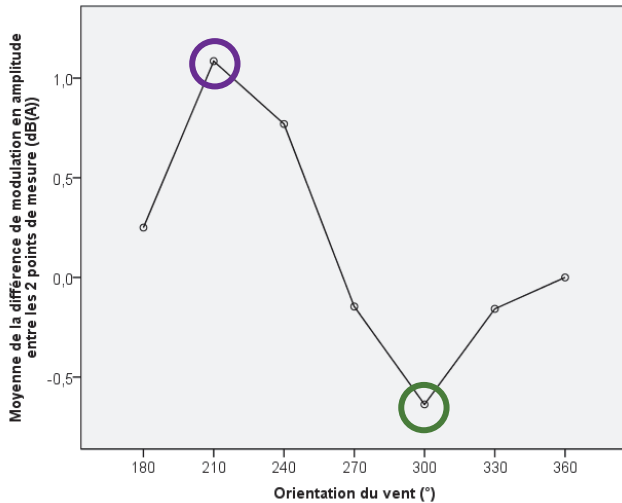


Figure 8 : Moyenne de la différence de D_{AM} calculée pour les 2 points de mesure en fonction de l'orientation du vent

En ce qui concerne le rythme de la modulation en amplitude, la Figure 9 illustre la détermination de la fréquence de fluctuation sur un enregistrement d'une minute. Le graphique du dessus est le niveau pondéré A, celui du dessous est celui affiché après calcul au moyen de la fonction Matlab précitée sur le fichier audio correspondant. Nous obtenons un résultat satisfaisant avec une valeur maximale de fluctuation positionnée à 1,025 Hz, ce qui correspond bien à la fréquence de la modulation calculée en comptant manuellement sur la période d'une minute. Par après, nous examinerons la corrélation qui existe entre la fluctuation de la modulation en amplitude et la vitesse du vent. Cette corrélation devrait être importante pour des vitesses ne dépassant pas la vitesse limite de rotation des pales. La suite de ce travail est en cours.

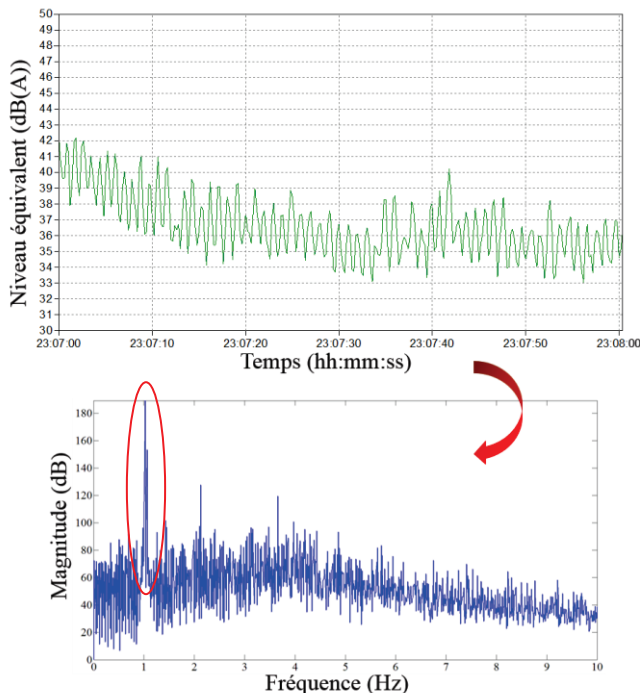


Figure 9 : Calcul de la fréquence de fluctuation (1,025 Hz) à partir du fichier audio dont le niveau présente une modulation en amplitude

5 Conclusion

La problématique du bruit éolien pose encore de nombreux défis, tant du point de vue de la modélisation que de celui de la mesure. Les considérations pratiques lors de cette dernière sont fortement contraignantes et doivent être clairement définies dans un protocole adapté à la réalité du terrain lors de campagnes.

Malgré la possibilité de présence de tonalités, la caractéristique qui domine le bruit éolien, tant du point de vue des niveaux sonores enregistrés que de celui de la description par les habitants proches de l'éolienne, est la modulation en amplitude. Cette dernière peut être analysée par sa profondeur de modulation et par le rythme de sa fluctuation, celui-ci devant être encore approfondi. La modulation donne un critère supplémentaire d'appréciation de la gêne causée par les éoliennes et permettrait de pouvoir détecter plus facilement le bruit éolien lors d'enregistrements et limiter ainsi l'analyse « manuelle ». Néanmoins, pour des mesures à grande distance, nous nous attendons à des émergences à plus faible profondeur de modulation, les niveaux sonores étant plus élevés mais moins modulés dans la direction du vent, direction préférentielle de propagation du son.

Enfin, l'ambiance sonore générale du lieu où se déroulent des mesures est cruciale. Il est important de se sensibiliser à l'ensemble des sources de bruits influençant les mesures, l'émergence du bruit éolien pouvant être discrète car son niveau peu élevé et son spectre large. Pour cette raison, le concept d'émergence nous paraît peu adéquat dans beaucoup de situations : il n'est pas aisé de quantifier le bruit éolien seul à cause des différents bruits provenant de plusieurs sources (bruit éolien, bruit routier, bruit d'oiseaux, etc.) si les gestionnaires de parcs éoliens n'arrêtent pas régulièrement le fonctionnement de leurs machines. De plus, si ces bruits se font entendre simultanément sans que l'un domine, ne faudrait-il pas prendre en compte ces moments lors des analyses ? Non, d'après la majorité des réglementations, empêchant la mesure d'un impact réel du bruit éolien.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes du service de Physique générale ainsi que le personnel du domaine de Chevetogne pour leur collaboration, en particulier messieurs Gérard Bournonville et Bastien Patris.

Références

- [1] The European Wind Energy Association, Wind in power: 2015 European statistics, report (February 2016).
- [2] <http://ventderaison.com/>
- [3] D. Bowlder & G. Leventhall (Eds), Wind Turbine Noise, Multi-Science Publication (2011).
- [4] S. Oerlemans & P. Fuglsang, Low-noise wind turbine design, EWEA Workshop, Oxford (2012).
- [5] G. P. van den Berg, Effect of the wind profile at night on wind turbine sound, *Journal of Sound and Vibration*, **277**, 955 – 970 (2004).
- [6] H. A. Madsen, F. Bertagnolio, A. Fischer & C. Bak, Correlation of amplitude modulation to inflow characteristics, in *Proceedings of Inter-Noise 2014*, Melbourne (2014).
- [7] H. Tachibana, Outcome of systematic research on wind turbine noise in Japan, in *Proceedings of Inter-Noise 2014*, Melbourne (2014).
- [8] <http://www.domainedechevetogne.be/fr/colien.php?style=stylebase>
- [9] International Electrotechnical Commission. IEC 61672-1: Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications. First edition (2002).
- [10] J. Florentin, B. Fauville, M. Gérard, F. Moïny, P. Rasmont, G. Kouroussis & O. Verlinden, Soundscape Analysis and Wildlife Presence in the Vicinity of a Wind Turbine, in *Proceedings of Euronoise 2015*, Maastricht (2015).
- [11] B. Fauville & F. Moïny, Wind turbine noise: practical immission measurements, in *Proceedings of Inter-Noise 2014*, Melbourne (2014).
- [12] J. Cooper & T. Evans, Automated detection and analysis of amplitude modulation at a residence and wind turbine, in *Proceedings of Acoustics 2013*, Australian Acoustical Society, Victor Harbor (2013).
- [13] O. Lartillot, P. Toiviainen & T. Eerola, A Matlab Toolbox for Music Information Retrieval, in C. Preisach, H. Burkhardt, L. Schmidt-Thieme & R. Decker (Eds.), *Data Analysis, Machine Learning and Applications*, Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization, Springer-Verlag, 2008.
- [14] O. Lartillot, MIRtoolbox 1.6.1 User's Manual, Aalborg University, Denmark (2014).