

Caractérisation expérimentale du bruit de ventilateurs et d'éoliennes

Anbo Cao, Maëlle Breton

Enseignant responsable : Tommy Rigall

MODEX promotion 2019,

ENSTA, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau Cedex.

Sommaire

1	Introduction	2
2	Dispositif expérimental	2
2.1	Modèle d'éolienne	2
2.2	Chambre anéchoïque	2
2.3	Micro et acquisition des mesures	3
2.4	Protocole expérimental	3
2.5	Remarques sur les mesures	4
2.5.1	Vérification de la symétrie	4
2.5.2	Le mystère du pic à 100 Hz	4
3	Influence de la vitesse de rotation des pales	4
3.1	Mesures avec différentes vitesses de rotation	4
3.2	Directivité et variance	5
3.3	Signaux brut de pression	5
3.4	Analyse Spectrale	6
4	Influence de l'inclinaison des pales	8
4.1	Directivité	8
4.2	Analyse Spectrale	8
5	Influence de la distance à la tour	9
5.1	Mesures avec différente distance à la tour	9
5.2	Directivité	9
5.3	Analyse spectrale	10
6	Etude d'autres paramètres	12
6.1	Pression acoustique et la distance	12
6.2	Forme des pales	14
7	Conclusion	14
8	Remerciements	16

1 Introduction

La transition énergétique amorcée depuis quelques années a provoqué une forte croissance du développement des énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'énergie éolienne a eu la plus rapide augmentation (entre 2008 et 2009 : augmentation de 32 %, en progression de 38 GW)[3]. L'exploitation de l'énergie éolienne présente ainsi de grandes perspectives et est considéré comme un secteur porteur.

De nombreux parcs éoliens sont actuellement en projet, leurs localisations deviennent inévitablement plus proches des habitations que par le passé. Ainsi, la question des nuisances des éoliennes sur la vie des riverains, les paysages et la biodiversité devient de plus en plus souvent l'objet de débats. La principale nuisance évoquée est la nuisance sonore : 7% des français vivant à proximité des turbines se disent ainsi gênés par le bruit des pales. De plus des études montrent que les personnes vivant à proximité de fermes éoliennes, peuvent souffrir d'une qualité de vie amoindrie et ressentir un dérangement causant stress, problèmes de sommeil, mal de tête, anxiété, dépression et des dysfonctionnements cognitifs [5]. L'aspect variable du son produit par les éoliennes, les rendrait moins supportable pour les locaux qu'un bruit constant comme celui d'une usine en état de marche permanent. L'implantation de parcs éolien est ainsi très réglementée et des études sonores sont nécessaire à leur autorisation. Une simulation de l'impact sonore du fonctionnement des éoliennes est effectuée, prenant en compte la vitesse du vent, les conditions météorologiques ainsi que l'absorption acoustique due à l'effet du sol. L'émergence (modification temporelle du niveau sonore ambiant) ne doit pas dépasser 5 dB en France [2]. Pour comprendre et réduire ce bruit, des études sont nécessaires sur la provenance du son et comment le contrôler.

Plusieurs mécanismes de création de bruit sont identifiés. Le bruit peut être ainsi dû à une interaction entre la pale et une zone de turbulence, à l'interaction entre la pale et le mât de l'éolienne [1]. Durant ce module expérimental, nous avons tenté de caractériser le bruit engendré par une éolienne en nous intéressant à un ventilateur muni de pales. Puis nous nous sommes intéressés aux différents paramètres susceptibles d'influencer le bruit créé par une éolienne.

2 Dispositif expérimental

2.1 Modèle d'éolienne

Nous disposons de deux ventilateurs, un ventilateur industriel classique et un ventilateur sur lequel ont été posé des pales rectangulaire en plexiglace. Nous avons effectué la très grande majorité de nos mesures avec le second.

Notre modèle d'éolienne est très intéressant puisque nous pouvons faire plusieurs paramètres tels que l'inclinaison des pales et la vitesse de rotation.

Le dispositif présente un nombre de Reynolds d'environ 150000 et un nombre de Mach de 10^{-6} , nous sommes donc en écoulement turbulent subsonique.

2.2 Chambre anéchoïque

Nous avons effectué l'intégralité de nos mesures dans la chambre anéchoïque du Centre de l'Yvette. Ce type de chambre permet de recréer artificiellement des conditions dites de « champ libre » (le son se propage sans réflexion). Nous pouvons donc considérer que



Figure 1: A gauche le ventilateur industriel, a centre notre modèle d'éolienne, à droite dimension de notre modèle d'éolienne

les données proviennent uniquement du dispositif et que les réflexions sur les parois sont négligeables.

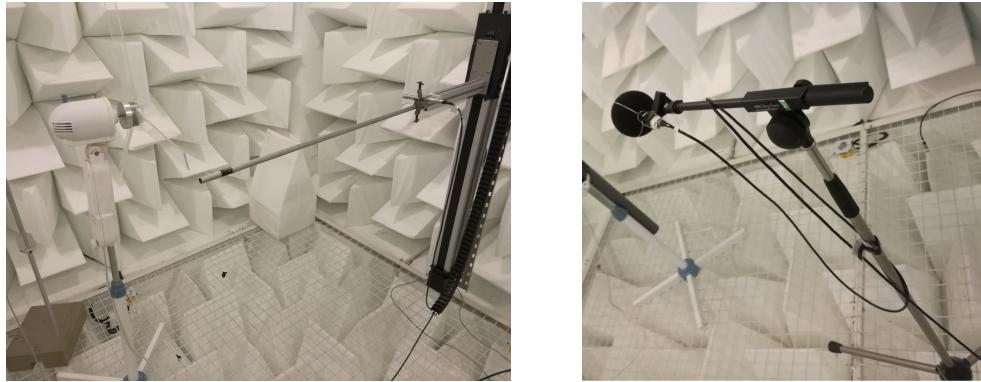


Figure 2: A gauche la chambre anéchoïque, à droite le micro

2.3 Micro et acquisition des mesures

Pour obtenir nos données en pression nous avons utilisé un micro relié à l'ordinateur par le biais d'un amplificateur. L'ordinateur reçoit des données en Volt que nous avons converti en valeur de pression.

Ce micro était monté sur un trépied que nous déplaçons pour obtenir des mesures à différents angles.

Dans toutes les mesures, l'intensité de niveau sonore est définie comme la pression acoustique. Elle vaut:

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p_e^2}{p_{ref}^2}$$

2.4 Protocole expérimental

Dans la très grande majorité de nos mesures, nous avons placé le micro à 80 cm du centre du rotor à l'aide de mètres et de solides connaissances en trigonométrie. Ce choix est motivé par la littérature, en effet 80 cm c'est 10 fois le diamètre du rotor, rapport utilisé par Oerlemans [4] dans son étude sur la modulation accoustique d'une éolienne.

Nous avons alors acquis des mesures pour les différents angles possibles pour obtenir un profil de directivité. Ces angles étaient déterminés à l'aide de mètres et de connaissances trigonométriques. Nous avons placé une bonnette sur le micro pour éviter de capter le son produit par l'interaction micro-écoulement. Un tableau récapitulant les mesures effectuées est représenté en figure 3.

	15 cm			8cm		5cm		Ventilateur	Ss pâles
	v1	v2	v3	tube	v1	v2	v1	v3	
-90°									
-60°									
-45°									
-30°									
-15°									
0°									
15°									
30°									
45°									
60°									
75°									
90°									
180°									

Figure 3: Tableau récapitulatif des mesures effectuées (les mesures effectuées sont représentées par les cases bleues)

2.5 Remarques sur les mesures

2.5.1 Vérification de la symétrie

Pour simplifier l'expérience et réduire de moitié le nombre de mesure à effectuer, il est utile de vérifier si la distribution spatiale du son produit est symétrique par rapport à l'axe de rotation. Des mesures sont réalisées avec les pales inclinés de 8° tournant à la vitesse 1. Pour l'inclinaison de 8°, la vitesse 1 correspond à 1250 tours/min avec une précision de plus ou moins 10 tours/min.

On a mesuré l'intensité à 0° et à 180° par rapport au plan de rotation. Le niveau d'intensité sonore à 0° vaut 50,06 dB avec une variance du signal brut égale à 4,05e-05Pa², et la pression acoustique à 180° vaut 50,99 dB avec une variance de 5,02e-05Pa². Considérant les autres mesures que l'on a faites, l'hypothèse de symétrie par rapport à l'axe de rotation est bien valide.

2.5.2 Le mystère du pic à 100 Hz

Dans toutes les mesures que nous avons effectué, nous obtenons en traçant l'analyse spectrale un pic à 100Hz. Nous avons donc effectué une mesure de la chambre anéchoïque vide, le pic était toujours présent. De plus, avant 100Hz, une puissance est quand même détectée mais elle est bien plus faible que celle obtenue lors des mesures.

3 Influence de la vitesse de rotation des pales

3.1 Mesures avec différentes vitesses de rotation

Nous nous sommes interrogés sur l'influence de la vitesse de rotation des pales sur le son produit par une éolienne.

Il semble indéniable que plus il y a de vent, plus une éolienne fait de bruit. Pour simuler l'effet du vent, nous avons fait varier la vitesse de rotation des pales et étudier les données de directivité, de variance, les spectres et les données de pression brut obtenus.

Notre éolienne peut tourner à trois vitesses différentes. Nous avons mesuré, ces vitesses pour des pales inclinées de 15° . La vitesse 1 correspond à 834 tours/min, la vitesse 2 à 975 tours/min et la vitesse 3 à 1215 tours/min avec une précision de plus ou moins 10 tours/min.

3.2 Directivité et variance

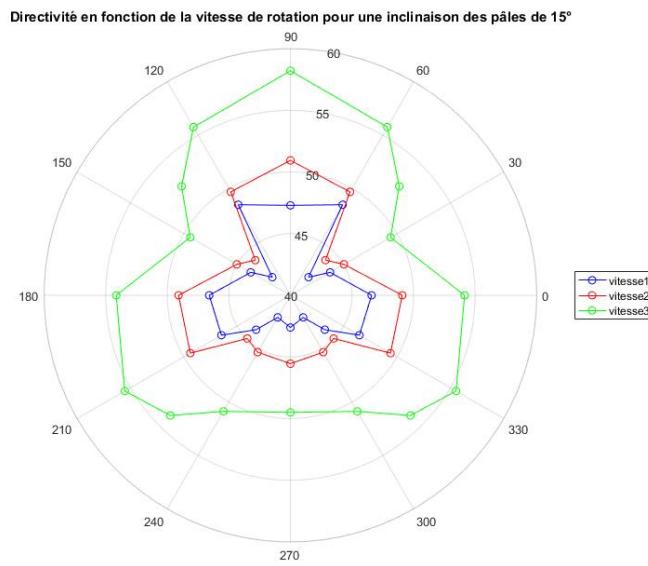


Figure 4: Directivité en fonction de la vitesse de rotation pour une inclinaison des pales de 15°

Nous remarquons que la vitesse de rotation influence le niveau d'intensité du son produit (figure 4). Cependant le schéma reste similaire pour les trois différentes vitesses, le niveau d'intensité sonore est plus importante à l'avant et dans l'axe des pales, avec un minimum entre 30° et 45° . L'influence de la vitesse de rotation sur l'intensité sonore et donc uniquement une question de puissance, il n'y a pas de changement de direction.

La variance (figure 5) est également dépendante de la vitesse de rotation. Elle suit globalement le même schéma que l'intensité, il y a une augmentation de la valeur proportionnelle pour les différents angles.

3.3 Signaux brut de pression

Le micro positionné à 0° (figure 6) capte un signal de périodicité très nette. Le signal est de forme sinusoïdale de même période que le temps de passage entre deux pale.

Cette caractéristique du son produit par une éolienne a également été observé par Oerlemans [4] dans son étude sur la modulation du son produit par une éolienne. Il explique que les modèles d'éolienne actuels produisent un "swishing noise" c'est-à-dire une variation du niveau sonore au passage de la pale. Cette variation est de quelques décibels.

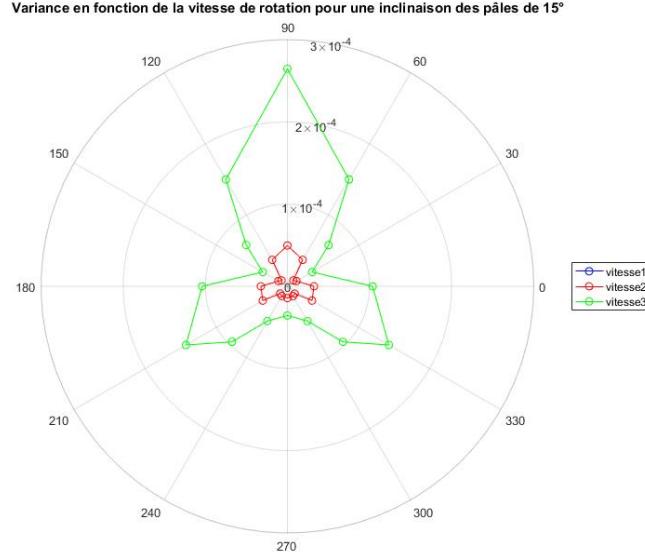


Figure 5: Variance en fonction de la vitesse de rotation pour une inclinaison des pales de 15°

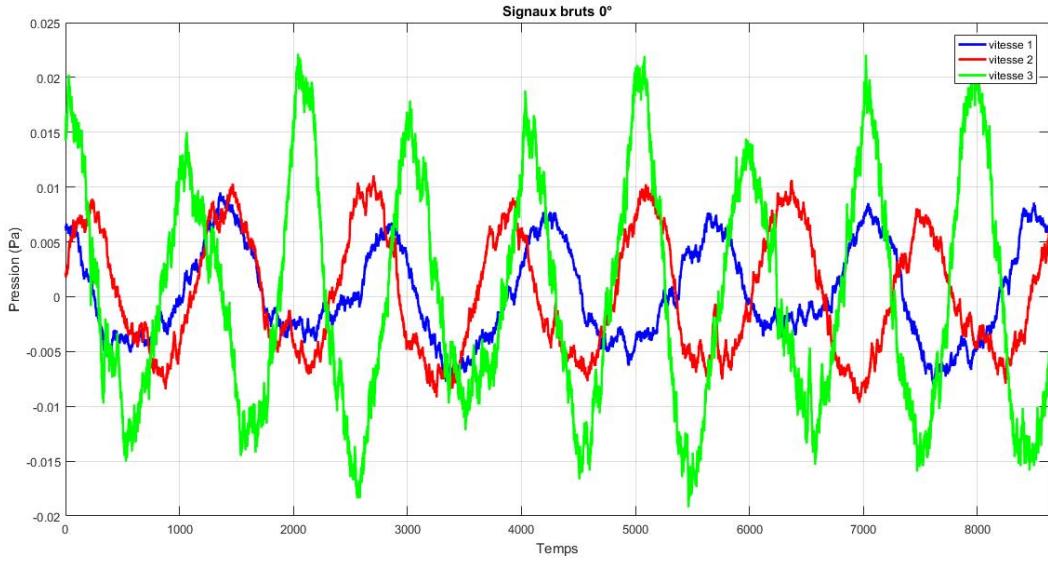


Figure 6: Signaux bruts à 0° en fonction de la vitesse de rotation pour une inclinaison des pales de 15° pour 2 rotation complète à la vitesse 1

Le micro à 90° (figure 7) capte un signal beaucoup plus flou mais on peut tout de même observer une périodicité à la vitesse 1 et à la vitesse 2. Les variations de niveau sonore proviennent donc dans l'axe des pales au passage de celles-ci mais ce n'est plus le cas à 90° . On peut supposer que les hauts niveaux de variance à 90° sont dus au fait que l'éolienne envoie le vent dans cette direction.

3.4 Analyse Spectrale

Les spectres traduisent également la périodicité dépendante de la rotation des pales.

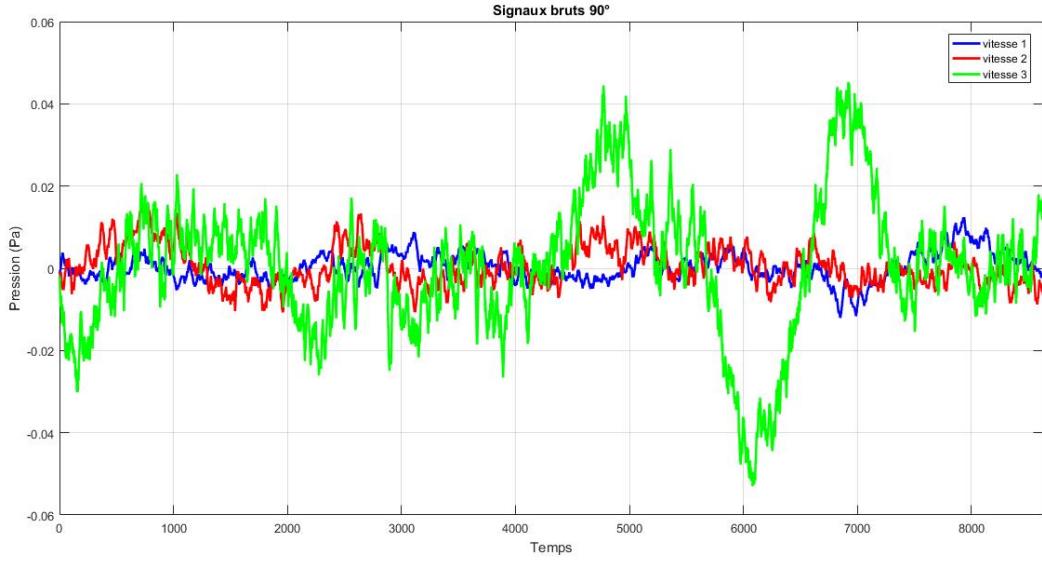


Figure 7: Signaux bruts à 90° en fonction de la vitesse de rotation pour une inclinaison des pales de 15° pour 2 rotation complète à la vitesse 1

A chaque harmoniques de la fréquence de passage des pales et jusqu'à une fréquence de 100 Hz, on observe un pic de puissance pour les trois différentes vitesses. Ces pics de fréquence décroissent plus l'harmonique est élevée. Après 100 Hz, on ne remarque pas de pics significatifs. Ce phénomène bien que visible pour tous les angles est beaucoup plus remarquable pour les valeur proches de l'axe des pales.

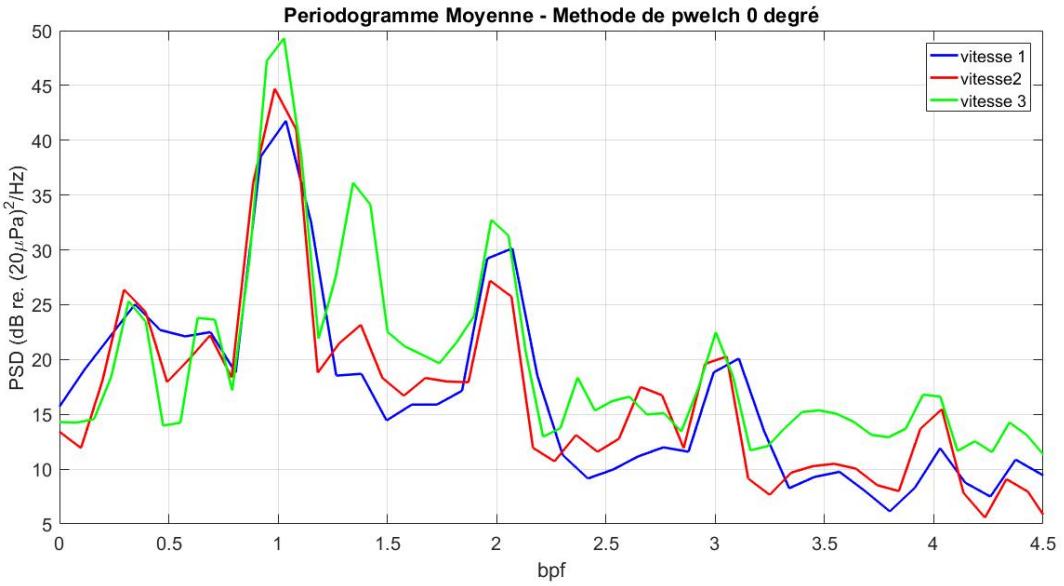


Figure 8: Analyse spectrale à 0°

4 Influence de l'inclinaison des pales

D'après des études [1], plusieurs mécanismes peuvent créer du bruit quand les pales tournent dans l'air. Ces mécanismes ont pour origine différentes parties des pales et il est difficile de les distinguer dans le son produit. Néanmoins l'inclinaison des pales est un facteur dans ces mécanismes. Il est alors utile de comparer le son produit avec des inclinaisons des pales différentes. L'inclinaison des pales peut être réglée en changeant l'anneau sur lequel les pales sont fixés. Il y a trois anneaux qui correspondent aux inclinaisons de 5° , 8° et 15° . Le ventilateur peut tourner à trois vitesses qui ne sont pas les mêmes pour des inclinaisons différentes. Cependant, le ventilateur devient vite instable quand les pales des petites inclinaisons tournent à une grande vitesse. On a donc comparé le son produit à la vitesse 1 de 5° , 8° et 15° . La vitesse 1 est de 1350 tours/min pour l'inclinaison de 5° , 1250 tours/min pour 8° et 834 tours/min pour 15° avec une précision de plus ou moins 10 tours/min.

4.1 Directivité

On constate (figure 9) que l'inclinaisons des pales influence en même temps le niveau d'intensité sonore et la directivité. Plus l'inclinaison est grande, plus faible est le son produit. Le maximum de son est environ 60° par rapport au ventilateur et le minimum est près de 45° . A basse inclinaison, la directivité est un peu différente. Le maximum est à 90° et le minimum est à 30° .

Il est intéressant de noter que la directivité de 5° à vitesse 1 ressemble un peu à la directivité de 15° à vitesse 3. On peut donc supposer que l'inclinaison et la vitesse de rotation se compensent en ce qui concerne la directivité.

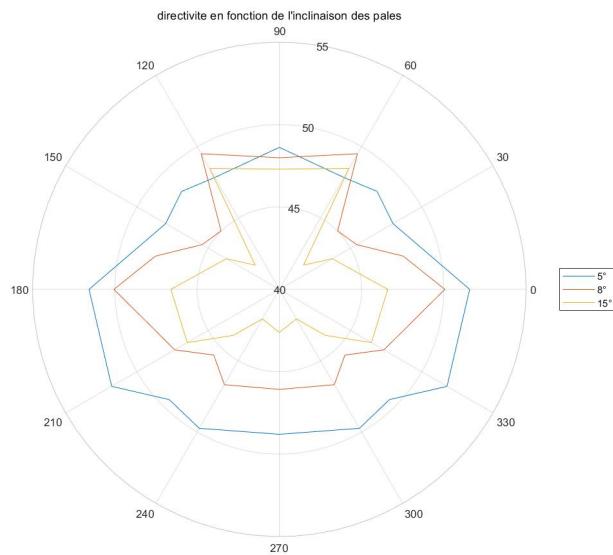


Figure 9: Directivité en fonction de l'inclinaison des pales

4.2 Analyse Spectrale

On calcule la puissance spectrale portée par chaque fréquence en utilisant la méthode pwelch (figure 10). On peut remarquer que l'énergie à basse fréquence est du même ordre

de grandeur dans tous les trois cas. Le son produit à basse fréquence est donc indépendant de l'inclinaison des pales, il est alors créé par des autres mécanismes dont on va parler plus tard. Quand la fréquence est plus grande que 10 fois la vitesse de rotation, on peut voir une différence stable entre les trois cas. Le son produit à haute fréquence est donc créé par les mécanismes liés aux pales et on peut le diminuer en augmentant l'inclinaison des pales.

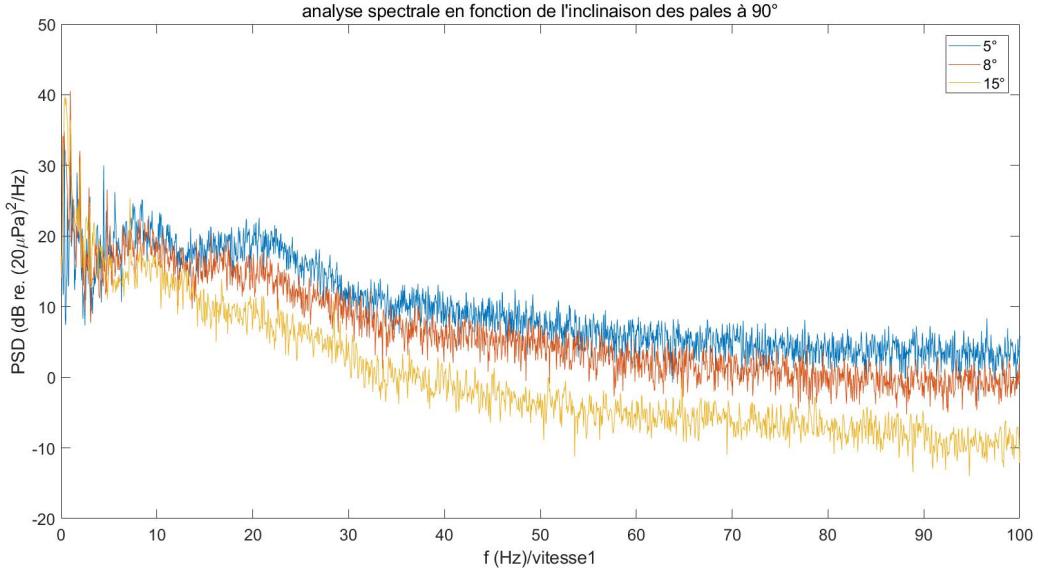


Figure 10: Analyse spectrale à 90° en fonction de l'inclinaison des pales

5 Influence de la distance à la tour

5.1 Mesures avec différente distance à la tour

D'après les études effectuées par Yauwenas [6], l'interaction entre les pales et le mât de l'éolienne est une importante source de création de bruit. On a donc décidé de mesurer le son produit par le ventilateur avec une distance au mât différente.

On a donc placé un tube avec un diamètre de 8cm devant la tour du ventilateur. De cette façon, la distance entre les pales et la tour est approximativement 3 cm contre 11 précédemment. Les pales sont inclinées de 15° et les mesures sont effectuées à la vitesse 3. On compare les résultats obtenus avec ceux avec pales inclinées de 15° tournant à la vitesse 3. On mesure de la même façon que pour les mesures précédentes.

5.2 Directivité

Les lignes légendées avec un b à la fin sont les résultats avec le tube. On remarque (figure 12) que la présence du tube change un peu la distribution spatiale du son. Le maximum de niveau sonore n'est plus exactement devant le ventilateur mais un peu dévié. Le maximum est à peu près à 75° par rapport au plan de rotation. Le minimum dans les résultats sans tube est à 30° et le minimum dans les mesures avec le tube est à 45° . De plus, le niveau d'intensité sonore est du même ordre de grandeur dans tous les cas. La

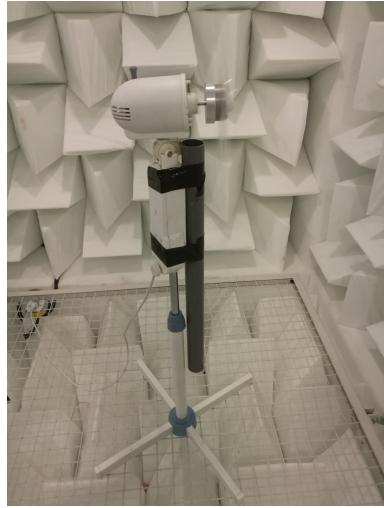


Figure 11: Un tube placé devant la tour du ventilateur

distance entre les pales et la tour a donc peu d'influence sur la directivité et l'intensité de niveau sonore.

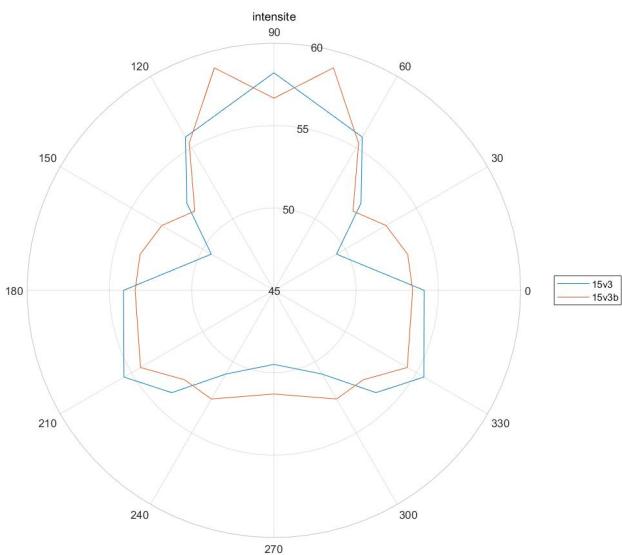


Figure 12: Directivité avec différentes distances entre les pales et la tour

5.3 Analyse spectrale

Quand la pale passe devant la tour, la pression autour de la pale est modifiée par la géométrie du mât. Si l'interaction entre les pales et la tour est une source de son, le son produit par ce mécanisme est alors lié avec la distance. A l'aide de la méthode pwelch on peut calculer l'énergie portée par chaque fréquence dans le son produit. Puis la densité spectrale est tracée en fonction de fréquence sur la vitesse de rotation. On a comparé le comportement spectral dans trois directions : -90°(figure 13), 0°(figure 14) et 90°(figure 15).

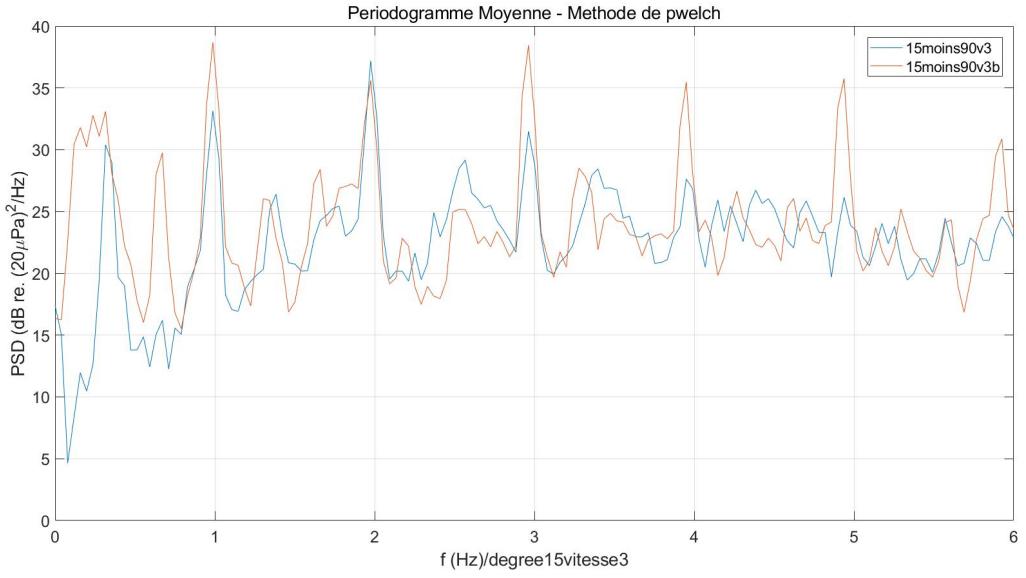


Figure 13: Analyse spectrale à -90° avec différentes distances entre les pales et la tour

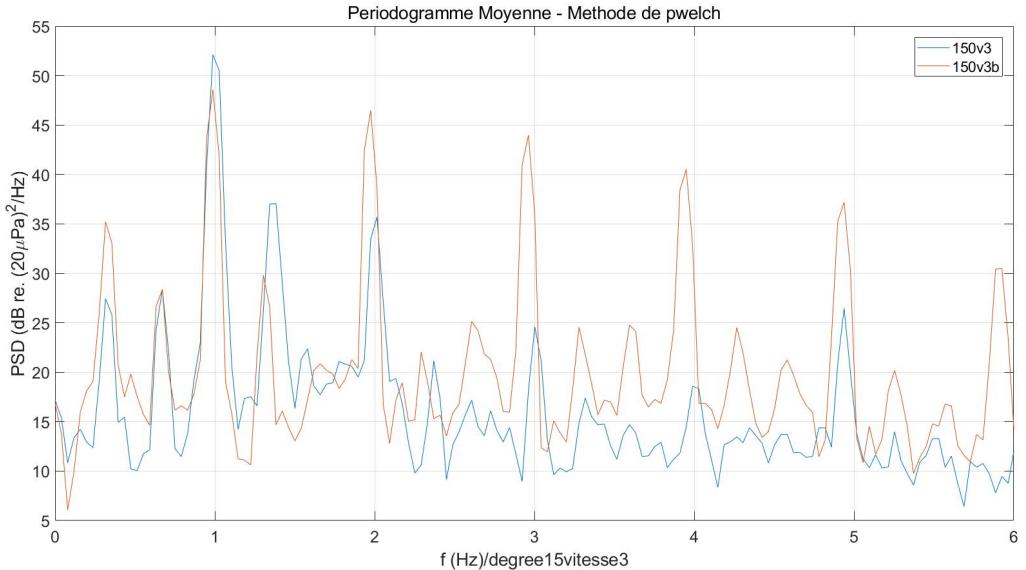


Figure 14: Analyse spectrale à 0° avec différentes distances entre les pales et la tour

On trace le périodogramme à basse fréquence et on divise l'abscisse horizontale par la vitesse 3 correspondant aux pales inclinées de 15° . On ne voit pas de pics remarquables sur le périodogramme aux hautes fréquences, on ne l'a donc pas représenté dans ce compte-rendu.

Il est surprenant que dans l'analyse spectrale pour -90° et 0° il y a souvent deux petits pics et puis un grand pic. Tous les grands pics sont sur les nombres entiers. Ce phénomène est plus remarquable dans le cas de ventilateur avec le tube, c.a.d le ventilateur avec une distance pales-tour diminuée. De plus, la valeur des pics décroît proportionnellement.

On peut donc supposer qu'un son est créé chaque fois qu'une pale passe devant la tour du ventilateur. On ne voit pas ce phénomène à 90° , ce qui peut signifier que d'autres sources du son jouent un rôle à l'avant de l'éolienne. L'interaction entre les pales et la

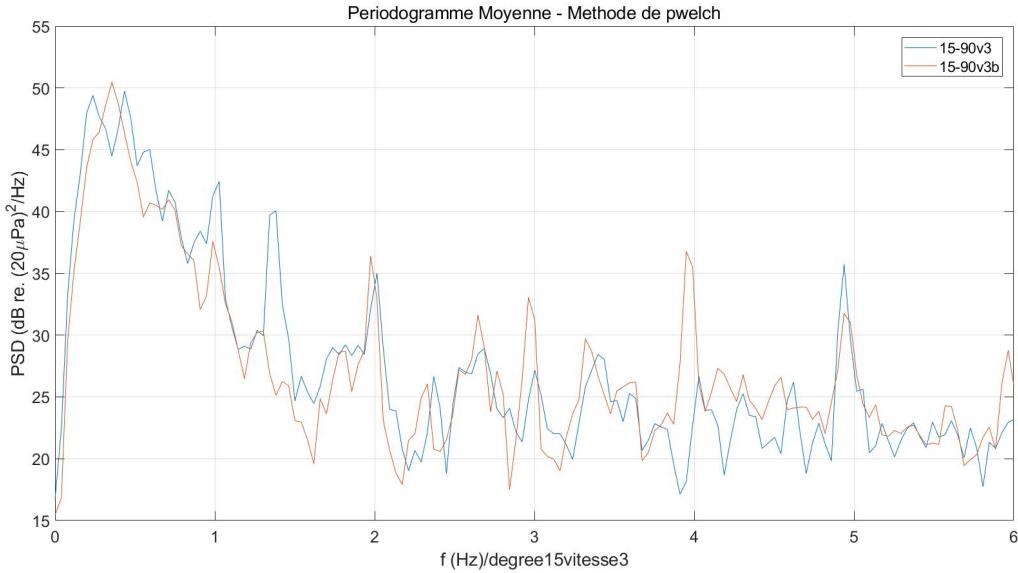


Figure 15: Analyse spectrale à 90° avec différentes distances entre les pales et la tour

tour est amplifiée quand la distance entre eux diminue, mais d'après l'étude sur l'intensité on sait que le niveau sonore produit n'est pas modifié.

6 Etude d'autres paramètres

6.1 Pression acoustique et la distance

Dans les mesures, le niveau sonore est représenté par la pression acoustique. Comme l'énergie portée par le son se propage dans l'espace sous forme sphérique, on peut avoir une relation entre la pression acoustique et la distance. On note L_w l'intensité acoustique et L_p la pression acoustique.

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} = 10 \log_{10} \frac{4\pi r^2 p_e^2}{\rho c W_{ref}} = 10 \log_{10} \frac{p_e^2 r^2}{p_{ref}^2} + k = L_p + 20 \log_{10} r + k$$

Avec k une constante. L_w est constante pour une source fixe. Du coup, on peut déduire que la pression acoustique correspond à:

$$L_p = -20 \log_{10} r + K$$

Avec $K = k - L_w$

Pour vérifier cette relation, on a d'abord mesuré le niveau sonore à 40cm, 60cm, 80cm et 100 cm du ventilateur. Les mesures sont faites avec des pales inclinés de 8° tournant à vitesse 1. On mesure le son à 90° par rapport au plan de rotation.

On peut voir (figure 16) que plus on est loin du ventilateur, plus le résultat correspond à la prédiction théorique. C'est parce que lorsqu'on est proche du ventilateur, la source du son ne peut pas être considérée comme un point et la propagation de son n'est pas sphérique. On constate que la théorie s'applique bien à grande distance.

De même on peut mesurer la pression acoustique à différentes hauteurs. Le centre des trois pales est à 105cm du sol, on a mesuré la pression acoustique à 67cm, 87cm et 105

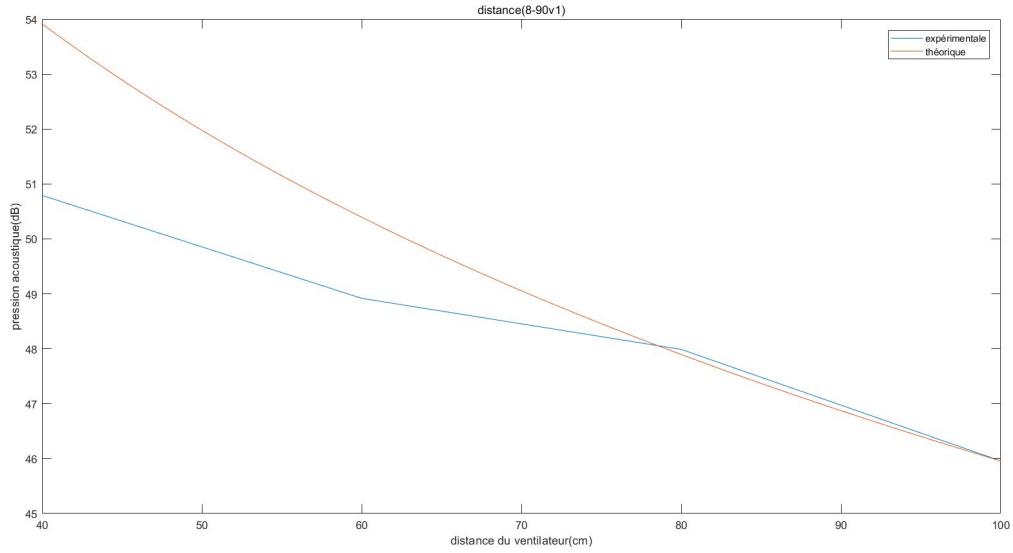


Figure 16: Pression acoustique à distance différente au ventilateur

cm. La distance horizontale au ventilateur est toujours de 80cm. Les mesures sont faites avec des pales inclinés de 15° tournant à la vitesse 3. On mesure le son à 0° par rapport au plan de rotation.

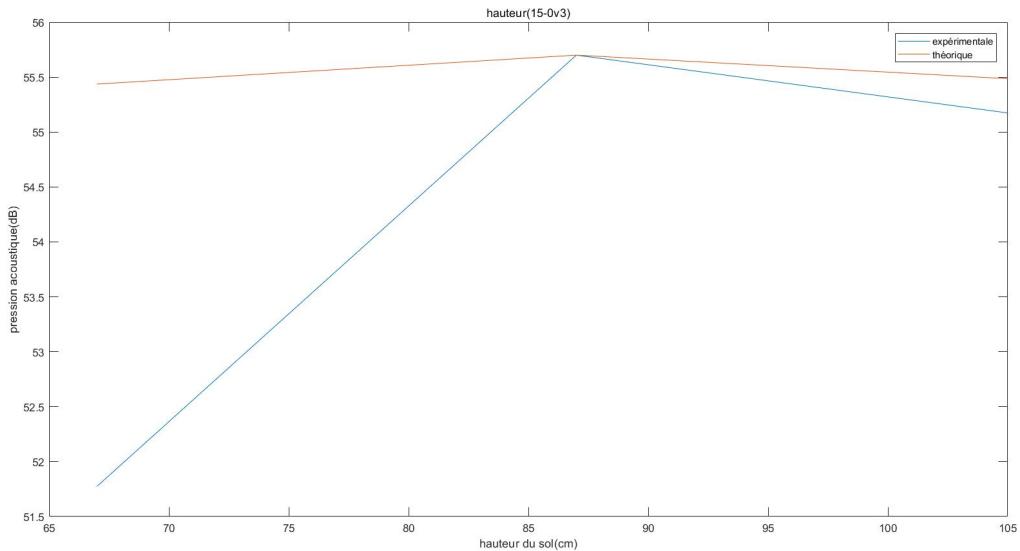


Figure 17: Pression acoustique à hauteur différent

Cette fois on voit (figure 17) que la prédiction théorique ne marche pas avec une hauteur plus basse. On trouve ce phénomène dans les autres directions aussi, le résultat expérimental est toujours 2 ou 3 décibels plus petit que le résultat prévu. On peut supposer que la grille au sol de la chambre anéchoïque peut influencer la création du son en modifiant le champ de pression autour du ventilateur et diminuer le son produit.

6.2 Forme des pales

Le modèle d'éolienne que l'on utilise a des pales rectangulaires. Il est alors intéressant de comparer ce modèle avec un ventilateur industriel, qui a une forme de pale plus compliquée.

On a mesuré dans 3 directions différentes: -90° , 0° et 90° . Le ventilateur industriel tourne à sa vitesse 3, cependant on n'a pas pu mesurer cette vitesse de rotation. La distance au ventilateur est toujours de 80cm. Il faut donc comparer avec les résultats avec des pales inclinées de 15° tournant à la vitesse 3.

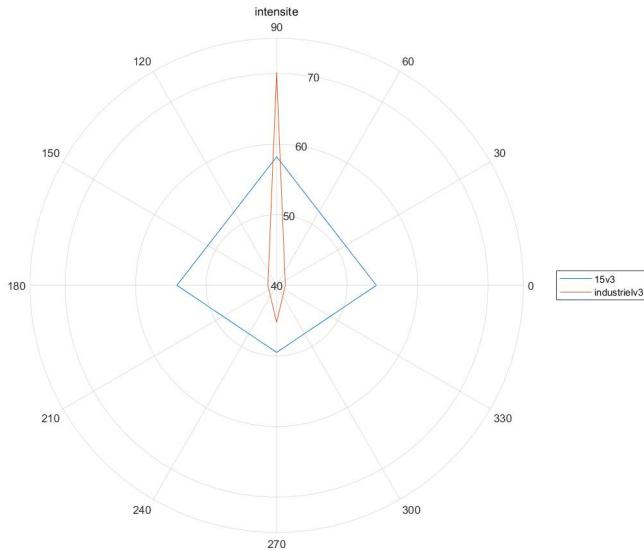


Figure 18: Directivité de ventilateur modèle et de ventilateur industriel

On voit une grande différence entre les deux ventilateurs. Le ventilateur industriel est beaucoup plus directionnel que le modèle d'éolienne. Comme le son est principalement créé par l'écoulement de l'air, on suppose que le ventilateur industriel a des pales de forme spéciale pour créer plus de vent à l'avant le ventilateur.

On a aussi fait l'analyse spectrale du ventilateur industriel et on compare avec le ventilateur avec pales inclinés de 15° (figure 19) (figure 20) (figure 21).

On constate que le phénomène de "deux petits pics et un grand pic" est plus remarquable pour un ventilateur industriel. Ce phénomène n'est pas visible devant le ventilateur, comme dans l'étude précédente.

7 Conclusion

Nous avons balayé dans cette étude un grand nombre de paramètres expérimentaux et nous sommes parvenus à des résultats souvent cohérents avec la littérature. La vitesse de rotation a une grande influence sur le niveau du son produit. Plus les pales sont inclinées, moins le son est important. Nous avons également mis en évidence, l'effet de la proximité du mât, le son produit est renforcé.

Certaines réserves méritent cependant d'être évoquées. Le dispositif présente une différence majeure avec une éolienne, ce n'est pas le vent qui l'entraîne mais un moteur et le son produit par celui-ci n'est pas négligeable (d'après la mesure sans pales et sans

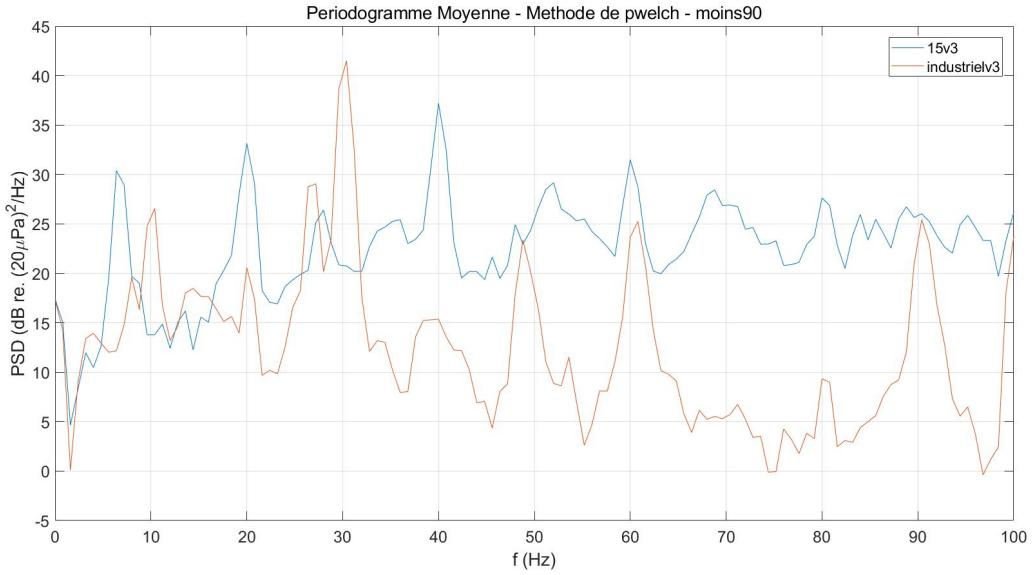


Figure 19: Analyse spectrale à -90° du ventilateur industriel

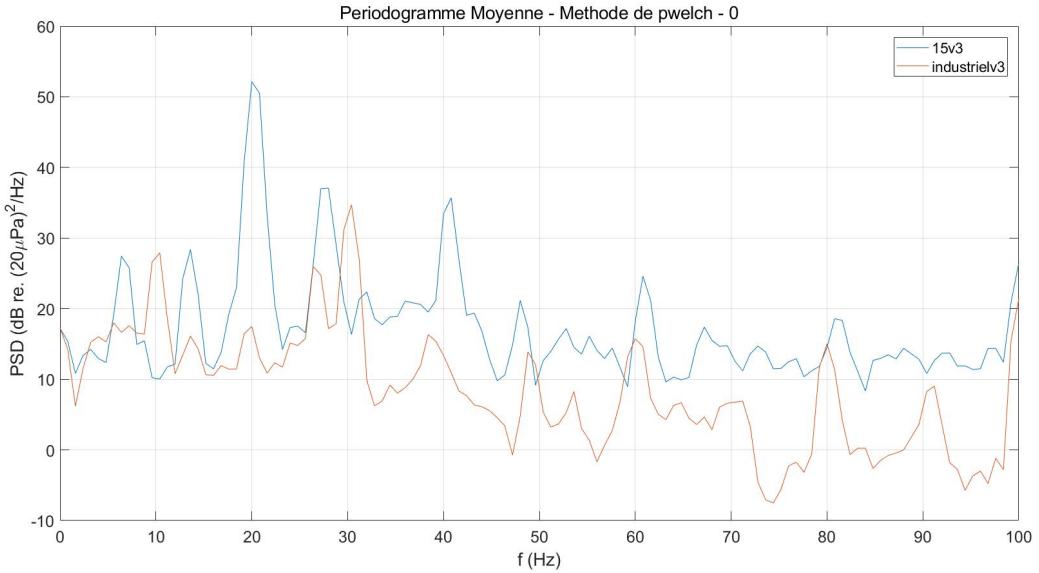


Figure 20: Analyse spectrale à 0° du ventilateur industriel

calle que nous avons effectuée). On peut cependant supposer que le bruit du moteur peut être assimilé au bruit de la génératrice entraînée par les pales de l'éolienne, nous pouvons donc considérer notre système comme représentatif. De plus, notre étude étant plutôt comparative nous avons décidé de ne pas tenir compte du bruit du moteur. Une seconde réserve concerne la hauteur à laquelle nous avons effectué nos mesures. Si l'on se place dans une situation réelle, les habitations ne se situeront pas à la même hauteur que le rotor mais bien plus bas. Notre étude ne montre pas vraiment les variations sonores telles que les percevront les riverains.

Nous avons vu dans l'étude de Doolan que le son produit par deux éoliennes côté à côté se renforce. Cela pourrait être le sujet d'une poursuite de ce module expérimental. De plus nous ne nous sommes consacré qu'à l'étude des mesures obtenues, il pourrait être

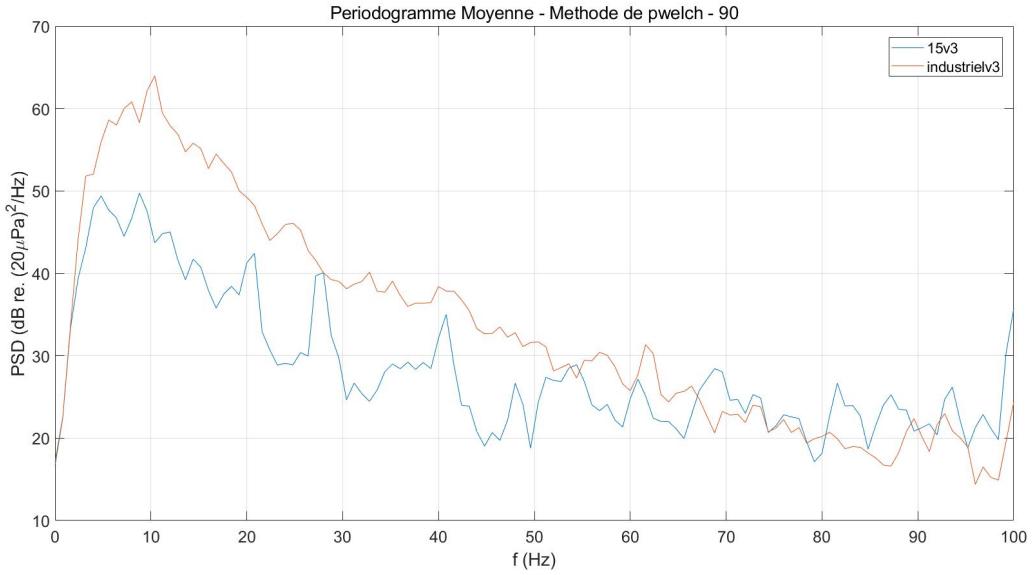


Figure 21: Analyse spectrale à 90° du ventilateur industriel

intéressant de chercher des modèles théoriques.

8 Remerciements

Nous tenons à remercier Tommy Rigall pour nous avoir aider et conseiller tout au long de ce module expérimental et pour avoir offert son ventilateur à la science en le transformant en modèle d'éolienne. Ce module a été très enrichissant sur la forme et le contenu. Nous avons essayé d'adopter une véritable démarche expérimentale tout en étudiant un phénomène d'actualité.

References

- [1] Con J Doolan, Danielle J Moreau, and Laura A Brooks. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. *Acoustics Australia*, 40(1), 2012.
- [2] Rapport du groupe d'expert de l'Afsset. Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2006et0005Ra.pdf>.
- [3] GIEC. Sources d'Énergie renouvelable et atténuation du changement climatique. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_fr.pdf.
- [4] S. Oerlemans. An explanation for enhanced amplitude modulation of wind turbine noise. *NRL*, July 2011.
- [5] Brett Horner Roy D. Jeffery, Carmen Krogh. Adverse health effects of industrial wind turbines. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3653647/>.
- [6] Yendrew Yauwenas, Branko Zajamšek, John Reizes, Victoria Timchenko, and Con J Doolan. Numerical simulation of blade-passage noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3):1575–1586, 2017.