

Dédopplerisation de Sources Acoustiques en Rotation

J.-H. Thomas^a, Y. Dammak^a, J. Carpentier^b, X. Wang^a et J.-C. Pascal^{a,b}

^aLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085
Le Mans, France

^bEcole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, Rue Aristote, 72085 Le Mans, France
jean-hugh.thomas@univ-lemans.fr

La problématique concerne la caractérisation de sources sonores mobiles en rotation via une antenne de microphones. Lorsque les sources sont en mouvement, les signaux captés présentent un effet Doppler qui masque les fréquences réellement émises. Il s'agit donc de retrouver ces fréquences par un traitement de dédopplerisation. Une technique basée sur la formation de voies est mise en œuvre pour caractériser le bruit rayonné par une pale d'éolienne ou de ventilateur dans l'objectif de fournir à distance un diagnostic de cette pale. L'étude est basée sur la simulation d'une source de bruit en rotation, représentée par un monopôle placé sur une pale d'éolienne. L'antenne comporte 36 capteurs répartis en spirale. L'article présente les algorithmes conduisant à simuler les signaux acquis par les microphones puis à compenser l'effet induit par le mouvement de la source et enfin à imager le rayonnement d'une pale. Les résultats montrent que les signaux synthétisés présentent bien un effet Doppler et que l'algorithme employé compense cet effet. Ils prouvent aussi l'intérêt de l'approche basée sur une formation de voies par suivi de la source, qui permet d'accéder au rayonnement d'une pale contrairement à une formation de voie opérée directement sur les signaux présentant l'effet Doppler.

1 Introduction

Les techniques d'imagerie acoustiques comme l'holographie acoustique de champ proche [1] ou la formation de voie [2] sont des outils bien adaptés à la localisation et à la caractérisation en termes de fréquences émises de sources sonores stationnaires fixes. Lorsque les sources sont animées d'un mouvement par rapport au récepteur, le problème est plus difficile à résoudre du fait de l'existence de l'effet Doppler. En effet, les fréquences reçues par l'antenne réceptrice ne sont pas les fréquences réellement émises. Le problème se rencontre par exemple lors de l'analyse du rayonnement du passage d'un train à grande vitesse et des études ont montré qu'il était possible de dédoppleriser les signaux acquis [3, 4], c'est-à-dire retrouver les vraies fréquences à partir du moment où la trajectoire de la source est connue. Dans ce cas, la trajectoire du train est rectiligne, sa vitesse supposée constante et sa position connue au cours du temps de passage. Le problème est similaire lorsque les sources de bruit sont animées d'un mouvement de rotation comme celui des pales d'une éolienne ou d'un ventilateur. L'étude présente focalise justement sur la caractérisation de sources acoustiques animées d'un mouvement de rotation.

Il est bien sûr possible et judicieux de recourir à des algorithmes de formation de voie de type processeur de Bartlett, méthode de Capon ... pour fournir une cartographie du rayonnement des sources à partir des signaux acquis par une antenne de microphones et ceci sans traitement de l'effet Doppler. Quelques études montrent l'intérêt de cette approche [5] qui permet certes de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu mais qui offre aussi des limites lorsque par exemple le but est de diagnostiquer l'état des pales d'une éolienne ou d'un ventilateur. L'objectif est alors d'accéder au rayonnement de la pale et il est nécessaire de compenser l'effet Doppler.

L'article présente une approche permettant la mise en œuvre d'un processus de diagnostic de pales. Elle repose sur des analyses théoriques [6, 7] déjà développées sur l'effet Doppler en espace libre ou en présence d'un flux uniforme. Les équations de la théorie sont appliquées dans le cadre de simulations dont le principe est de fixer un monopôle tournant sur une pale. Il est donc possible de modéliser le bruit généré par les pales en rotation à partir de plusieurs monopôles placés sur la même pale ou sur des pales différentes. Dans un premier temps, il s'agit de simuler les signaux acquis par une antenne de microphones et de vérifier la présence d'un effet Doppler dans les signaux. Ensuite une procédure de dédopplerisation est employée

sur les signaux synthétisés sur chacun des microphones. Un traitement de formation de voie permet alors d'imager le bruit rayonné par les pales.

2 Théorie

La source acoustique est supposée harmonique et émise par une pale en rotation suivant un modèle de monopôle tournant aux temps d'émission t . Le champ de pression acoustique $p(\vec{x}_n, t + \Delta t_n(t))$ émis à ces instants t , du fait du mouvement de la source, ne sera reçu par un microphone n de l'antenne à un emplacement \vec{x}_n qu'après un retard $\Delta t_n(t)$ qui dépend de la position de la source $\vec{\xi}(t)$ elle-même évoluant dans le temps. Le champ qui subit également, par l'effet Doppler, une modulation $D_n(t)$ s'écrit

$$p(\vec{x}_n, t + \Delta t_n(t)) = D_n(t) s(t), \quad (1)$$

où $s(t) = A \cos(2\pi f t + \phi)$ désigne le signal harmonique à la fréquence f , d'amplitude A et de phase à l'origine ϕ . Ici avec une vitesse subsonique de la source, les retards s'écrivent [7]

$$\Delta t_n(t) = -\frac{1}{c\beta^2} \langle \vec{M}(t), (\vec{x}_n - \vec{\xi}(t)) \rangle + \frac{1}{c\beta^2} \sqrt{\langle \vec{M}(t), (\vec{x}_n - \vec{\xi}(t)) \rangle^2 + \beta^2 \|\vec{x}_n - \vec{\xi}(t)\|^2}, \quad (2)$$

où $\vec{M}(t) = \vec{V}(t)/c$ désigne le vecteur de Mach, \vec{V} le vecteur vitesse instantanée de la source, $\beta^2 = 1 - \|\vec{M}(t)\|^2$, c la vitesse du son et $\langle \cdot, \cdot \rangle$ le produit scalaire. En présence d'un flux uniforme \vec{U} , le vent pour une éolienne, la modulation est [7]

$$D_n(t) = \frac{1}{4\pi (c\Delta t_n(t) + \langle \vec{U}/c - \vec{M}(t), \vec{x}_n - \vec{\xi}(t) - \vec{U}\Delta t_n(t) \rangle)}. \quad (3)$$

3 Algorithmes

3.1 Simulation des signaux captés par les microphones

Le problème provient des temps de réception

$$t_r = t + \Delta t_n(t), \quad (4)$$

qui fournissent une base de temps non uniforme. Or ce sont les signaux captés aux instants d'émission t correspondant à une base de temps régulière qui sont à synthétiser. Les étapes de la simulation sont les suivantes :

- création d'une base de temps t régulièrement échantillonnée à une fréquence d'échantillonnage f_e ,
- génération du signal acoustique émis aux instants t $s(t) = A \cos(2\pi f t + \phi)$,
- détermination des instants de réception t_r de l'Eq. (4) à partir des retards $\Delta t_n(t)$ de l'Eq. (3),
- calcul de l'atténuation $D_n(t)$ d'après l'Eq. (3),
- obtention des amplitudes des signaux reçus aux instants t_r par l'Eq. (1),
- interpolation des amplitudes des signaux fonctions de t_r aux instants t .

Les signaux ainsi construits présentent l'effet Doppler dû au mouvement de la source.

3.2 Dédopplerisation

Les données d'entrée de l'algorithme sont les signaux captés par les microphones de l'antenne en fonction du temps t . Il est de plus nécessaire de connaître la trajectoire de la source au cours du temps. Lorsque l'on souhaite diagnostiquer l'état d'une pale d'éolienne ou de ventilateur, c'est la trajectoire d'une des pales en rotation qui doit être connue. L'objectif de l'algorithme est de déterminer le champ de pression $p(\vec{x}_n, t + \Delta t_n(t))$ enregistré par chaque microphone à la position \vec{x}_n aux instants $t_r = t + \Delta t_n(t)$ non uniformément répartis dans le temps et pour lesquels les amplitudes des signaux acoustiques ne sont pas connues. Il contient les étapes successives :

- détermination du temps nécessaire aux ondes acoustiques émises par la source à sa position connue $\vec{\xi}(t)$ pour atteindre les microphones de l'antenne d'après l'Eq. (3),
- déduction des temps d'arrivée $t_r = t + \Delta t_n(t)$,
- calcul de l'atténuation attendue par l'Eq. (3),
- interpolation dans les signaux d'entrée des amplitudes correspondant aux instants t_r ,
- compensation de l'atténuation par le calcul de $p(\vec{x}_n, t + \Delta t_n(t))/D_n(t)$.

L'effet Doppler est alors anihilé par une dédopplerisation opérée par suivi du mouvement de la source.

3.3 Rayonnement d'une pale

Afin d'imager le rayonnement d'une pale, l'étape de dédopplerisation est réitérée sur chaque point i d'un maillage de I points de la pale à partir de la trajectoire connue de ces points. Le signal $s_i(t)$ émis par le point i de la pale est obtenu à partir de tous les signaux microphoniques selon

$$s_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{p(\vec{x}_n, t + \Delta t_n(t))}{D_n(t)}, \quad (5)$$

où N est le nombre de microphones de l'antenne. Ici, le retard et la modulation des Eqs. (3) et (3) sont déterminés à partir de la position $\vec{\xi}_i(t)$ du point i . Une fois les I signaux temporels obtenus, le choix d'une raie fréquentielle dans leurs densités spectrales de puissance permet de cartographier la puissance rayonnée par la pale à cette fréquence.

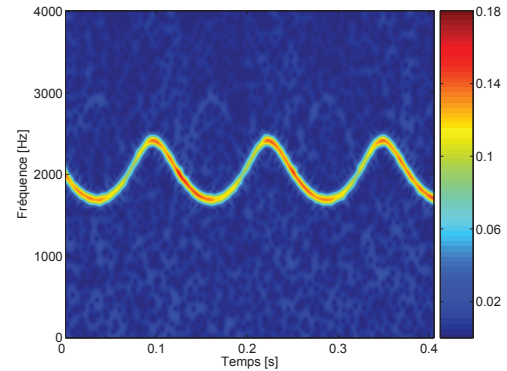


FIG. 1: Spectrogramme du Signal Doppler simulé par une source à 2000 Hz, RSB de 10 dB.

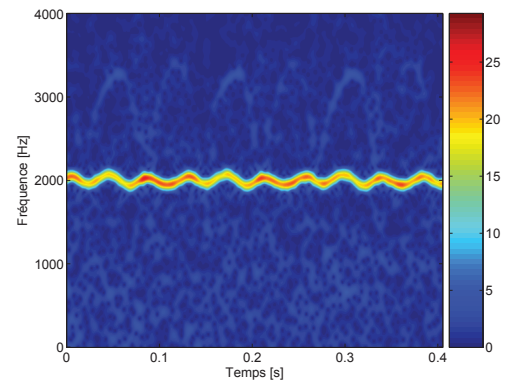


FIG. 2: Spectrogramme du signal du micro 1 dédopplerisé à partir de la trajectoire du point de la pale d'abscisse 0,82m et d'ordonnée 0m, fréquence de la source simulée 2000 Hz, RSB de 10 dB.

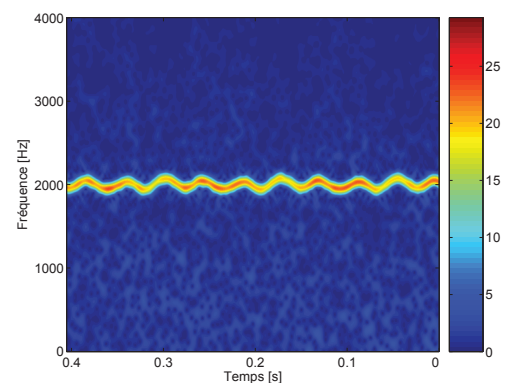


FIG. 3: Spectrogramme du signal reconstruit en moyennant tous les signaux microphoniques, RSB de 10 dB.

4 Résultats

Les paramètres des simulations sont les suivants : antenne de 36 microphones organisés en une spirale à cinq branches, hauteur du mat de l'éolienne 10,2m, longueur des pales 1,86m, vitesse 477 tr/mn, distance source-antenne 12m, vitesse du vent 10 m.s^{-1} . L'envergure de l'antenne et la position des microphones sont telles que la bande passante du système de mesure est [400 Hz, 7000 Hz].

4.1 Traitement de l'effet Doppler

Il s'agit d'une part de simuler l'effet Doppler puis de vérifier l'efficacité de la dédopplerisation. Pour ce faire, une source monopolaire émettant un signal harmonique de fréquences 500 Hz ou 2000 Hz est placée à 0,82 m du rotor sur une pale. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 8000 Hz. Au signal émis est superposé un bruit blanc additif gaussien dont le rapport (de puissances) signal à bruit (RSB) est fixé à 0 dB ou 10 dB. L'effet Doppler, caractéristique des signaux reçus par les microphones en présence d'une source en mouvement, est simulé. Ensuite la procédure de dédopplerisation est opérée à partir de la trajectoire connue du point source. Enfin une moyenne des signaux dédopplerisés pour chaque microphone est effectuée. Les figures 1 à 9, qui représentent des spectrogrammes de signaux, illustrent les résultats pour les deux fréquences testées et les deux rapports signal à bruit. Les figures 1, 7 et 4 montrent les spectrogrammes des signaux simulés reçus par un microphone de l'antenne. L'examen de ces figures met bien évidence la présence d'un effet Doppler. Les figures 2, 5 et 8 présentent les spectrogrammes des signaux dédopplerisés pour une source à 0,82 m du rotor dont la trajectoire est connue. L'effet Doppler est effectivement fortement diminuée. La dédopplerisation semble plus efficace pour 500 Hz que pour 2000 Hz. Les figures 3, 6 et 9 indiquent les spectrogrammes des signaux obtenus par moyennage des signaux captés par tous les microphones de l'antenne, une fois dédopplerisés. Il semble ici plus intéressant de moyenner les signaux lorsque le bruit additif est faible. D'après les simulations avec une source, la dédopplerisation tolère jusqu'à un RSB de -10 dB, correspondant à une émergence du pic harmonique sur le bruit de fond d'environ 9 dB dans la densité spectrale de puissance (avec des tronçons de 256 points).

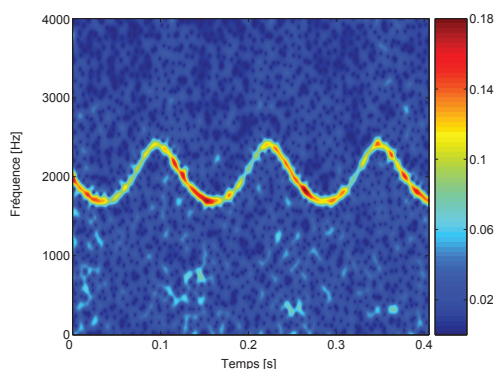


FIG. 4: Spectrogramme du signal Doppler simulé par une source à 2000 Hz, RSB de 0 dB.

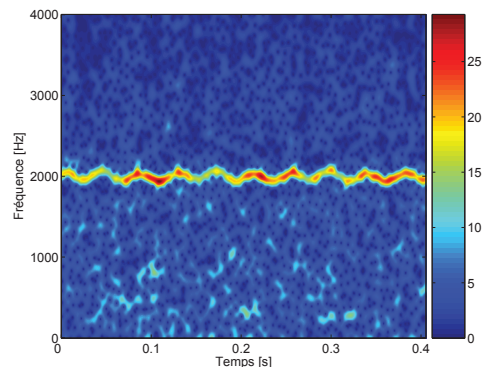


FIG. 5: Spectrogramme du signal du micro 1 dédopplerisé à partir de la trajectoire du point de la pale d'abscisse 0,82m et d'ordonnée 0m, fréquence de la source simulée 2000 Hz, RSB de 0 dB.

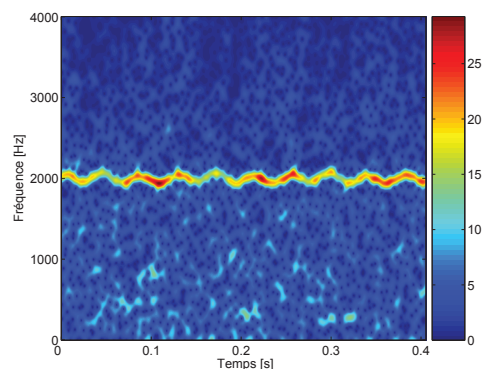


FIG. 6: Spectrogramme du signal reconstruit en moyennant tous les signaux microphoniques, RSB de 0 dB.

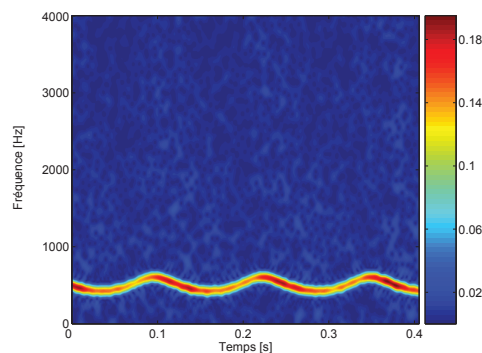


FIG. 7: Spectrogramme du signal Doppler simulé par une source à 500 Hz, RSB de 10 dB.

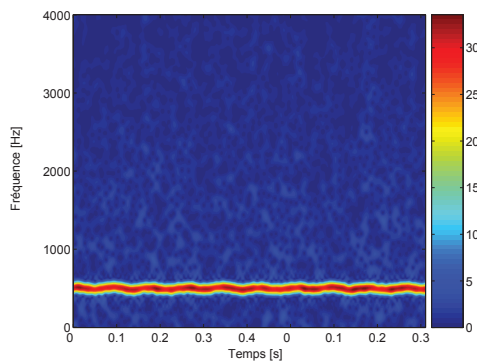


FIG. 8: Spectrogramme du signal du micro 1 dédopplerisé à partir de la trajectoire du point de la pale d'abscisse 0,82m et d'ordonnée 0m, fréquence de la source simulée 500 Hz, RSB de 0 dB.

4.2 Rayonnement d'une pale

Il s'agit maintenant, conformément à la section 3.3, de reconstruire ce qui est rayonné par une pale en itérant successivement l'étape de dédopplerisation sur chaque point d'un maillage échantillonnant la surface d'un rectangle de largeur 0,32m et de longueur 1,86m, schématisant la pale. Ici 10 points sont utilisés suivant la longueur et 7 points suivant la largeur pour un maillage de 70 points. Pour cette étude, plusieurs configurations sont utilisées (voir Tableau 1). Une première situation consiste à fixer sur une pale un monopôle tournant, générant une onde harmonique de fréquence 500 Hz (C1) ou 2000 Hz (C2). La deuxième situation consiste à fixer sur deux pales un monopôle tournant à des rayons différents, à nouveau avec une excitation à 500 Hz (C3) ou 2000 Hz (C4). Toutes les simulations ont été effectuées avec un RSB de 10 dB. Les figures 10 et 11 illustrent le rayonnement des deux pales lors de l'utilisation d'une seule source pour les deux fréquences considérées. Il est intéressant de constater que la source est bien localisée à 500 Hz, un peu moins bien à 2000 Hz. La méthode permet bien de différencier les pales puisque dans les deux cas, peu de rayonnement apparaît sur la deuxième pale (sans monopôle). Ceci est également confirmé sur les figures 12 et 13 dans le cas de deux sources. A 500 Hz, les sources sont bien localisées (voir figure 12). A 2000 Hz, le résultat est cohérent avec une localisation assez satisfaisante même s'il existe des différences de niveau entre les sources (voir figure 13). L'application directe d'un algorithme classique de formation de voies sur les signaux simulés, captés par l'antenne de microphone et non dédopplerisés ne donne pas du tout la même information (voir figure 14) et ne permet pas de diagnostiquer l'état d'une pale.

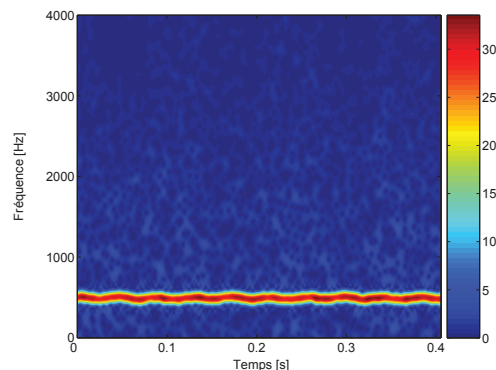


FIG. 9: Spectrogramme du signal reconstruit en moyennant tous les signaux microphoniques, RSB de 10 dB.

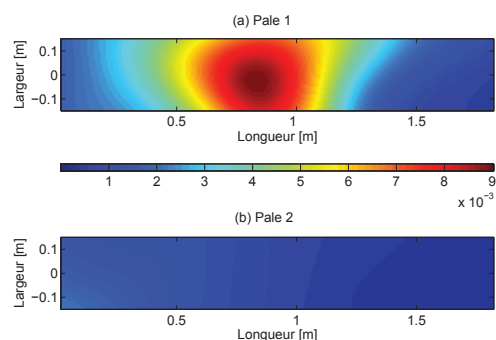


FIG. 10: Reconstruction des signaux rayonnés par 2 pales (configuration C1), fréquence 500 Hz, RSB de 10 dB.

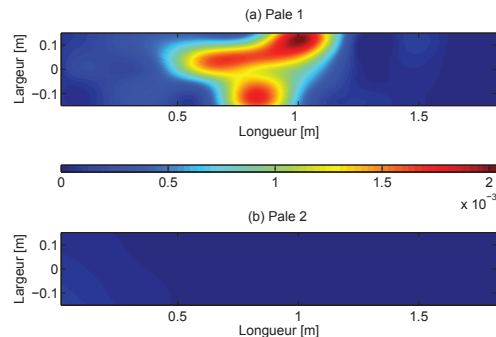


FIG. 11: Reconstruction des signaux rayonnés par 2 pales (configuration C2), fréquence 2000 Hz, RSB de 10 dB.

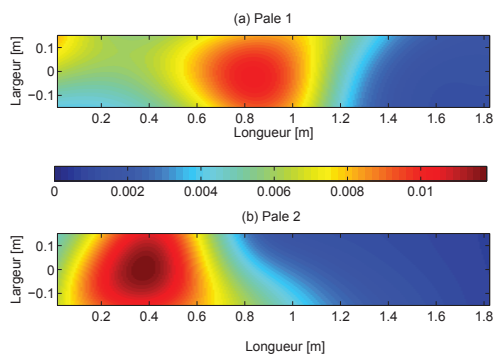


FIG. 12: Reconstruction des signaux rayonnés par 2 pales (configuration C3), fréquence 500 Hz, RSB de 10 dB.

TABLEAU 1: Configurations des simulations

Configuration	Fréquence	Source pale 1		Source pale 2	
		x	y	x	y
C1	500 Hz	0,82 m	0 m	x	x
C2	2000 Hz	0,82 m	0 m	x	x
C3	500 Hz	0,82 m	0 m	0,42 m	0 m
C4	2000 Hz	0,82 m	0 m	0,42 m	0 m

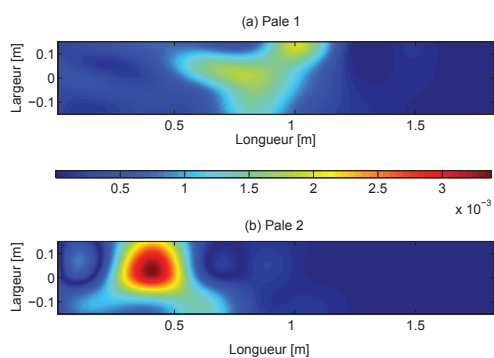


FIG. 13: Reconstruction des signaux rayonnés par 2 pales (configuration C4), fréquence 2000 Hz, RSB de 10 dB.

5 Conclusion

La problématique abordée dans cette étude concerne la caractérisation de sources sonores mobiles en rotation à partir d'une antenne de microphones. L'approche a consisté à simuler dans un premier temps les signaux acquis par les microphones en y incorporant un effet Doppler dû au mouvement de la source acoustique modélisée par un monopôle tournant. Dans un second temps, l'application sur ces données d'un processus de dédopplerisation a permis de reconstituer le rayonnement d'une pale. Les sources ont bien été localisées à l'emplacement où elles ont été émises montrant l'intérêt du traitement par formation de

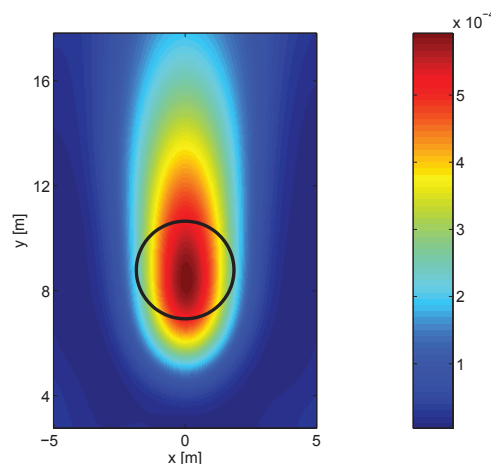


FIG. 14: Image de la puissance rayonnée par l'éolienne à la fréquence de 2000 Hz obtenue par formation de voies à partir des signaux simulés dans la configuration C4 (le cercle noir indique la trajectoire de l'extrémité d'une pale).

voies et suivi de la source au cours du temps. Ces travaux appellent des perspectives autour de l'étude de l'influence des paramètres de la méthode (fréquence d'échantillonnage, nombre de sources, dimension de l'antenne ...) et d'une validation expérimentale. Les résultats encourageants des simulations montrent que le diagnostic d'une pale est envisageable à partir du moment où sa trajectoire est connue au cours du temps.

Références

- [1] E. G. Williams, *Fourier Acoustics : Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*, Academic Press, San Diego, CA (1999).
- [2] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, Beamforming : a versatile approach to spatial filtering, *IEEE ASSP Magazine*, 4-24 (1988).
- [3] B. Barsikow and W. F. King, On removing the Doppler effect frequency shift from array measurements of railway noise, *J. Sound Vib.*, **120**(1), 190-196 (1988).
- [4] J. -C. Valière, F. Poisson, C. Depollier and L. Simon, High-speed moving source analysis using chirplets, *IEEE Signal Processing letters*, **6**(5), 113-115 (1999).
- [5] S. Oerlemans, P. Sijtsma and B. Méndez Lopez, Location and quantification of noise sources on a wind turbine, *J. Sound Vib.*, **299**, 869-883 (2007).
- [6] A. P. Dowling, J. E. Ffowcs Williams, *Sound and sources of sound*, Wiley (1983).
- [7] S. Oerlemans, *Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines*, Thesis, University of Twente (2009).