Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 3

Artikel: Réduction des émissions de bruit des éoliennes
Autor: Chevillat, Yves
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856205

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Réduction des émissions de bruit des éoliennes

État de la recherche

Le bruit fait partie des problématiques liées à l'éolien, et ce, particulièrement en Suisse où les turbines se trouvent souvent à proximité des habitations. La source majeure de bruit est de type aérodynamique et, à vitesse élevée, le bruit de traînée en constitue la composante principale. Ce dernier est généré lorsque la couche d'air proche de la pale franchit l'arête de sortie. Il fait l'objet d'études expérimentales dont certaines présentent d'encourageants résultats via la modification des pales ou la gestion active du fonctionnement de l'éolienne.

Yves Chevillat

La raréfaction des ressources fossiles et la prise de conscience de leurs impacts ont poussé au développement des énergies renouvelables et en particulier de l'énergie éolienne. Aujourd'hui, cette dernière bénéficie d'une technologie mature et sa production mondiale annuelle correspond à 610 000 GWh, soit 10 fois la consommation électrique suisse.

L'évolution technologique récente des éoliennes a considérablement augmenté le potentiel de cette énergie en Suisse. Celui-ci a été estimé à 5300 GWh/an par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). En prenant en compte les zones d'exclusion environnementales et paysagères ainsi que des distances prudentes par rapport aux habitations, la Confédération prévoit que l'énergie éolienne couvrira 7 % des besoins énergétiques de la Suisse en 2050, soit 20 % de l'objectif attribué aux nouvelles énergies renouvelables.

Cependant, quelques préoccupations accompagnent le développement de l'énergie éolienne. Ces désagréments, moins dangereux toutefois que ceux liés aux énergies non renouvelables, conviennent d'être traités avec sérieux. Le son (bruit) est l'un d'entre eux. Avec une diminution du bruit des éoliennes, l'acceptation des projets serait renforcée et le potentiel à long terme en Suisse pourrait devenir encore plus important.

La perception du bruit varie en fonction de l'émetteur, du milieu de propagation et du récepteur. Cet article recense les expériences pratiques ayant pour thème la diminution des émissions de bruit éolien et leur état d'avancement. Il se focalise donc uniquement sur l'émetteur : il ne s'intéresse ni aux systèmes de protection contre le bruit qui agissent sur la propagation, ni aux travaux d'entretien de l'émetteur qui permettent d'éviter une croissance de l'émission de bruit, ni enfin aux facteurs de sensibilité de chaque personne face au bruit qui caractérisent le récepteur.

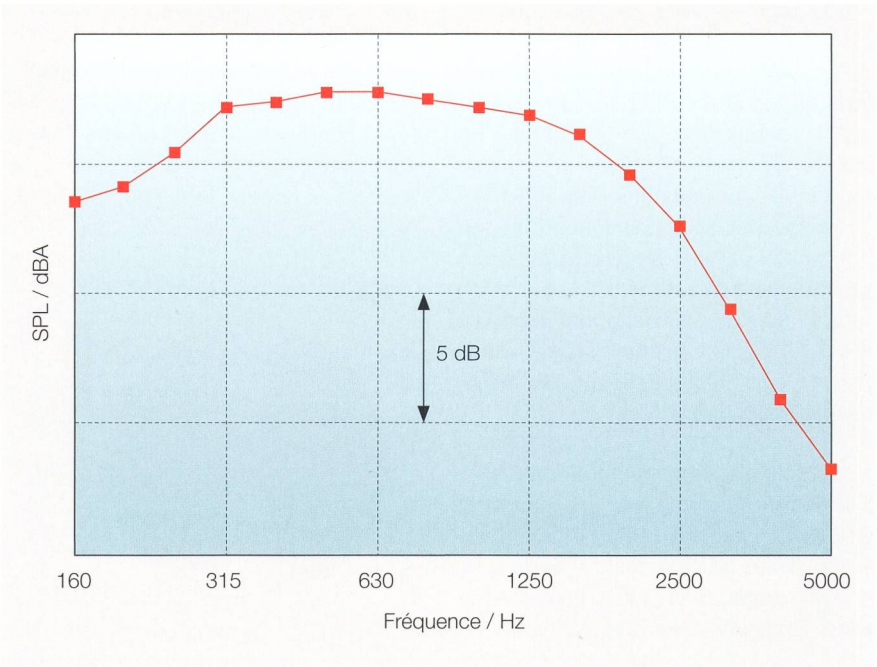
Son / bruit

Le « son » est une « onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales ». Par extension physiologique, le son désigne la « sensation auditive à laquelle cette vibration est susceptible de donner naissance ».

Le « bruit », quant à lui, est décrit comme un « son indésirable et potentiellement nuisible » [1]. Cependant, bien que « bruit » soit le terme associé aux nuisances sonores, soit celles qui entraînent des sentiments négatifs, les termes « bruit » et « son » sont souvent utilisés indifféremment, comme dans cet article.

Immission de bruit

Pour qu'il y ait immission de bruit, il faut un récepteur. Les lois visent d'abord à protéger les personnes des immissions de bruit dans les habitations. Les mesurages intra-muros sont toutefois difficiles à mettre en pratique car ils dépendent de l'isolation et des dimensions détaillées de la maison, de la manière dont elle est



[3]

Figure 1 Spectre sonore typique d'une éolienne.

[3]

Figure 2 Origine du son perçu par un observateur placé en face de l'éolienne.

remplie, mais aussi de l'emplacement exact du microphone. La plupart des législations fixent donc, à défaut, des limites extra-muros avec le but de prévenir le bruit intra-muros. En Suisse, c'est l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) qui définit les seuils de bruit général à ne pas dépasser.

Émission de son d'une éolienne

La représentation typique du son d'une éolienne (figure 1) montre le niveau de pression acoustique (sound pressure level ou SPL) aux différentes fréquences qui le composent. Ce graphique est appelé « spectre » et affiche des valeurs moyennées sur une durée à spécifier.

Le spectre est parfois approximé par une valeur L, soit l'intensité du bruit, généralement donnée en dBA, qui représente le niveau sonore supposé perçu par l'être humain. C'est le résultat d'une somme logarithmique des différentes fréquences du spectre.

Origine des sons de l'éolienne

Les bruits des éoliennes sont soit d'origine mécanique, soit d'origine aérodynamique. Dans les éoliennes modernes, les bruits d'origine mécanique, générés par les composants dans la nacelle, ont été minimisés [2]. Ce sont donc les bruits d'origine aérodynamique qui dominent.

Diverses sources de bruit d'éolienne d'origine aérodynamique ont été répertoriées dans la littérature [3,4]. La principale composante semble être le « bruit de traînée », viennent ensuite le « bruit d'interaction d'entrée » et le « bruit de pointe » généré à l'extrémité de la pale.

Le bruit de traînée

En arrivant sur une pale, le vent forme une couche, typiquement d'environ 25 mm d'épaisseur [5], qui « colle » à la pale : elle est dénommée « couche limite » (boundary layer). Au début souvent de type laminaire, cette couche devient généralement turbulente en parcourant le flanc de la pale. Si le vent a un angle d'attaque important, c'est-à-dire si les pales sont orientées de façon à exposer une grande surface au vent, l'épaisseur de la couche du côté succion (derrière le vent) de la pale sera plus épaisse, alors que celle côté pression (face au vent) sera plus mince. L'épaisseur et la nature de ces couches influencent fortement le bruit en sortie de pale ou « bruit de traînée » (trailing edge noise).

Oerlemans montre analytiquement dans [6] que la pression acoustique p du bruit de traînée d'une section de pale peut être déterminée approximativement grâce à l'équation :

$$p^2 \sim U^5 \cdot \frac{L\delta}{r^2} \cdot \cos^3\gamma \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\varphi \qquad (1)$$

U étant la vitesse relative du flux par rapport à la pale (addition de la vitesse du vent et de la vitesse de la pale), L la largeur de la section de pale considérée, δ la grandeur caractéristique des turbulences, r la distance à l'observateur, $\cos^3\gamma$ l'efficacité de la dispersion du son en fonction de son angle par rapport à la normale au bord de sortie, $\sin^2(\theta/2)$ la directivité du son par rapport au plan médian de sortie et $\sin\varphi$ la directivité latérale du son par rapport au bord de sortie.

Cette approximation prédit que le bruit de traînée sera majoritairement dirigé en direction du bord d'entrée ($\theta = 180°$). De fait, lorsque la pale descend, le son serait dirigé principalement vers le sol, alors que lorsqu'elle monte, le son serait dirigé vers le ciel[1]. Cela expliquerait la majeure partie du « bruit variable » typique écouté à proximité des turbines.

Plusieurs mesurages, en laboratoire puis en conditions réelles, ont validé que pour un observateur placé devant l'éolienne, le bruit est généré majoritairement par les pales lorsqu'elles descendent (figure 2) [7].

[7]

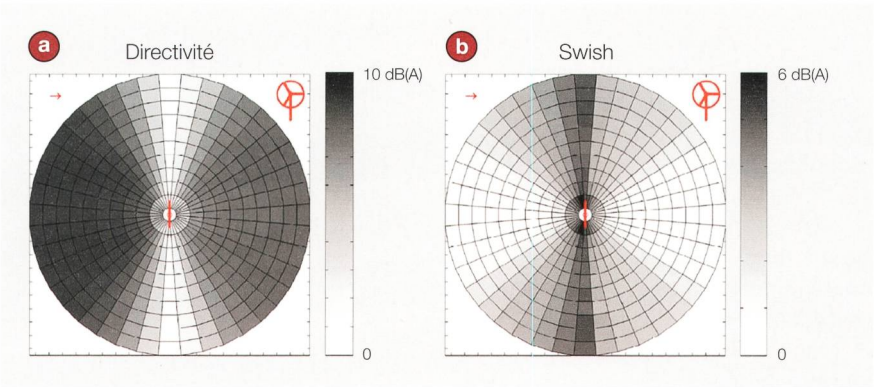
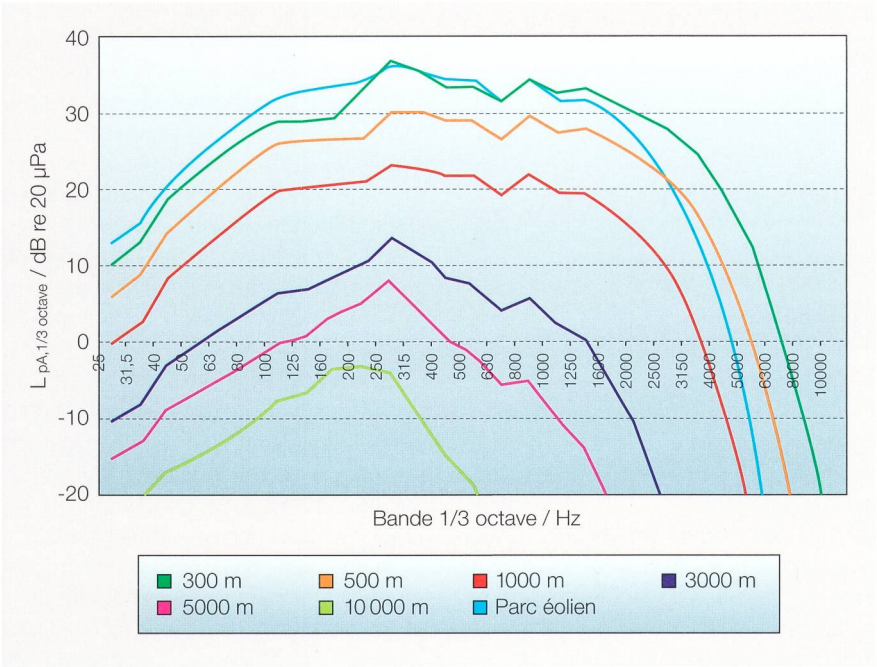


Figure 3 Diffusion du bruit autour d'une éolienne vue du ciel. Valeurs (a) absolue et (b) relative (modulation d'amplitude).



[3]

Figure 4 Spectre simulé pour différentes distances d'une éolienne avec un mât de 90 m, en terrain agricole découvert. L'intensité du bruit *L* équivalente à 300 m est de 45 dBA.

Ces données corrèlent avec **l'équation 1**. Expérimentalement, on constate bien que le bruit dominant dans les éoliennes modernes est le bruit de traînée et que le niveau de bruit prédit grâce à **l'équation 1** correspond précisément à la réalité.

De telles prédictions peuvent également être réalisées pour d'autres positions de l'observateur. Placé sur le côté de l'éolienne, il expérimentera un bruit moyen moins élevé que l'observateur se trouvant devant ou derrière celle-ci. Par contre, il en percevra une variation (swish) plus élevée **(figure 3)**.

Propagation du son des éoliennes

Bien que cela ne soit pas le propos de cette recherche, il est intéressant de savoir que la propagation à longue distance du son est fonction de plusieurs facteurs. Dans [8], Sondergaard identifie les facteurs de « distance », d'« absorption par l'air » et d'« effet de sol » comme les plus influents dans le cas des éoliennes. Ces effets sont difficiles à dissocier. Il en ressort les considérations suivantes : d'une part, le spectre des fréquences de bruit émises par une éolienne couvre une large bande dont la partie la plus significative se situe entre 200 Hz et 2000 Hz et, d'autre part, une augmentation de la distance induit habituellement une baisse de la puissance acoustique accompagnée d'un glissement vers les basses fréquences **(figure 4)**.

Pistes d'amélioration

Les études ayant pour objectif la réduction du bruit des éoliennes peuvent être réparties dans trois catégories :

- les mesures « proactives », qui cherchent à limiter le bruit en modifiant les pales ;
- les mesures « actives », qui visent à annuler le bruit ;
- et les mesures dites « d'exploitation », qui limitent le bruit en régulant la puissance.

Il est à relever que les études purement théoriques ne sont pas prises en compte : seules sont considérées les études pour lesquelles des essais pratiques ont été réalisés.

Mesures proactives

En agissant dès la conception, il est possible d'influencer les sources potentielles de sons les plus importantes, et ce, de différentes manières.

Modification du profil de la pale

En changeant le profil de la pale, l'épaisseur de la couche limite côté succion peut être réduite. Ce faisant, on intervient sur le terme δ de **l'équation 1** et l'intensité du son est diminuée tandis que la fréquence est augmentée. Le profil de la pale côté pression est lui aussi modifié afin de garder de bonnes performances. Les résultats en laboratoire et sur un modèle réduit d'éolienne montrent une diminution de bruit, sans dégradation des performances, allant jusqu'à 4 dBA.

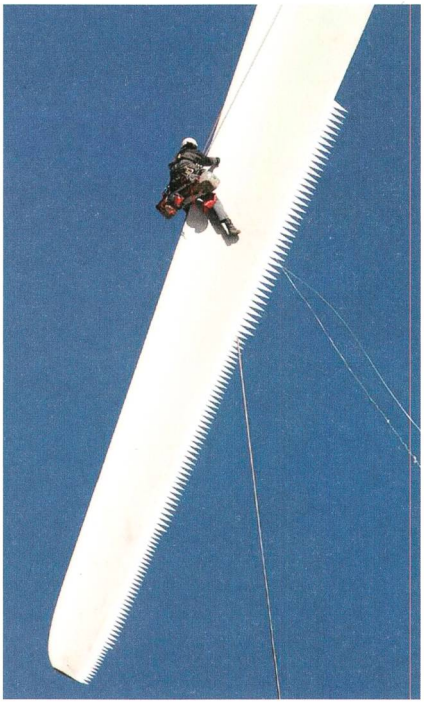
Des essais comparant des profils de pale standard et optimisé [9] ont été menés sur une éolienne de 2,3 MW. Les résultats ont montré que le profil optimisé réduit le bruit dans les basses fréquences. Toutefois le bruit de pointe de cette pale augmente dans les hautes fréquences, principalement lorsque la pale remonte et particulièrement avec des vents faibles. Le bruit moyen total diminue toutefois de 0,5 dBA par rapport à la pale standard.

Ajout de dentelures

Une autre approche consiste à insérer des dentelures en sortie de pale **(figure 5)**. L'angle γ de **l'équation 1** entre le flux sortant et la normale au flanc de sortie de la pale est de ce fait modifié **(figure 6)**. Le facteur $\cos^3\gamma$ diminue et donc le bruit.

En théorie, un angle γ égal à 45° permettrait de diminuer le bruit de 5 dB. En pratique, une atténuation pouvant atteindre 4 dB a été mesurée sur des modèles réduits.

Des essais comparatifs entre profils de pale standard et muni de dentelures [9] ont été menés sur une éolienne de 2,3 MW. Les résultats ont montré que la dentelure atténue le bruit dans les basses fréquences. Le bruit moyen total est réduit de 3,2 dB par rapport à celui engendré par la pale standard. Il est à relever toutefois que l'angle entre le plan des dentelures et celui du flux sortant devrait idéalement être nul afin d'éviter de générer des sons de haute



[9]

Figure 5 Dentelures en sortie de pale.

Planair

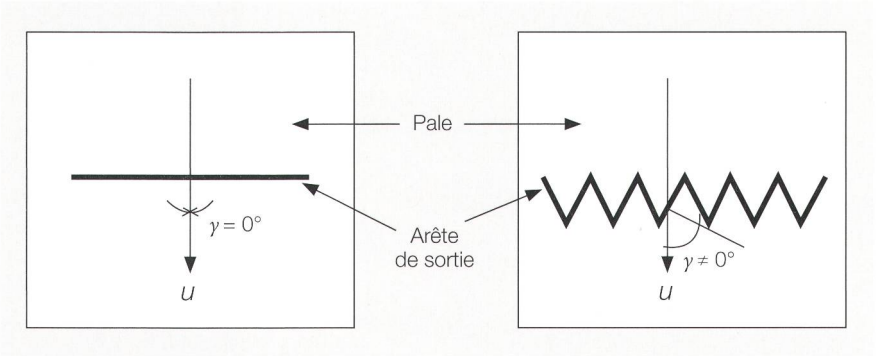


Figure 6 Modification de l'angle γ entre la normale à l'arête de sortie et la direction du vent (u).

fréquence [10]. Pour des turbines en production, cela pourrait poser un problème, car l'angle de sortie du vent dépend de sa vitesse et cette vitesse varie sans cesse.

Ajout de brosses

La même approche est envisagée avec des brosses en sorties de pales. Leur ajout vise à lisser les discontinuités du flux d'air sortant. L'avantage par rapport aux dentelures précitées réside dans le fait que les poils de la brosse vont s'aligner avec le flux d'air sortant, évitant ainsi la génération de sons de haute fréquence mentionnée au paragraphe précédent. Les tests en laboratoire ont montré une réduction significative du bruit (2-10 dB) [11]. Cette solution reste toutefois à valider en grandeur nature.

Mesures actives

Le contrôle actif du bruit consiste à générer un second bruit de même amplitude que le bruit indésirable mais en opposition de phase, le but étant que les deux se superposent et s'annihilent. Pour ce faire, des processeurs de traitement du signal sont généralement utilisés. La seconde source doit en effet être capable de générer un son avec les mêmes fréquences et amplitudes que la source.

Les applications de cette méthode sont aujourd'hui limitées à des sources de bruit dont la fréquence est connue, telles que les transformateurs de sous-stations [12]. Des sources de bruit à large spectre et dont l'amplitude varie, comme les éoliennes, en sont de ce fait pour le moment exclues. Même si ces difficultés venaient à être surmontées, il faudrait en résoudre une dernière : en effet, la source secondaire doit être placée à proximité immédiate de la source de dérangement. Or les sources de bruit principales sont les extrémités des pales : il paraît donc compliqué de placer des sources de bruit à ces endroits.

Mesures d'exploitation

Plusieurs fabricants fournissent une fiche technique relative à un mode d'opération « faible bruit » ou « bridé » de leur machine qui limite la vitesse maximale de rotation du rotor. Ces modes sont utilisés notamment dans les pays dont la régulation concernant le bruit de nuit est plus restrictive.

En se référant à **l'équation 1**, il s'agit ici d'interagir sur la vitesse U, car celle-ci dépend de la vitesse de rotation des pales. Les bruits émis par plusieurs modèles d'éoliennes modernes voient ainsi leur intensité diminuer de 4 dBA lorsque la puissance est réduite de moitié, soit en fonctionnement à puissance nominale et en mode bridé. Il est malheureusement difficile de quantifier la perte d'énergie que le mode bridé génère, les exploitants de parcs ne communiquant que rarement des informations à ce sujet.

Dans un document nommé « Sound reduction system » [13], Vestas, un constructeur d'éoliennes, fait part d'un système permettant de limiter la vitesse de rotation, et donc le son, en fonction du moment (par exemple nuit, jour de la semaine ou saison) et de certaines combinaisons de direction et vitesse de vent. Il paraît intéressant de poursuivre dans cette direction afin de focaliser les bridages de turbines sur les situations de bruit problématiques et pas uniquement sur la base d'un horaire.

Conclusion et perspectives

Malgré 30 ans d'études consacrées au bruit éolien, les sources de dérangement ne sont pas encore clairement identifiées, ce qui démontre bien la complexité du sujet. De grands progrès ont déjà été réalisés mais des améliorations restent possibles, notamment au travers de certaines stratégies visant à réduire le bruit des éoliennes à l'émission.

L'optimisation des pales va logiquement se poursuivre : les bruits sont des vibrations qui se traduisent certainement par une perte d'énergie. Les constructeurs rechercheront ces gains de productivité et continueront donc à intégrer ces améliorations.

L'ajout d'éléments en sortie de pale semble également prometteur car il rend moins directif le bruit de l'éolienne, ce qui devrait permettre de diminuer la puissance auditive à l'immission, mais aussi d'en atténuer les modulations d'amplitude. Il faudra cependant encore plusieurs années de tests, notamment en ce qui concerne le vieillissement de ces éléments, avant de les voir à l'œuvre.

Zusammenfassung **Reduzierung der Schallemissionen von Windkraftanlagen**

Stand der Forschung

Die Verknappung der fossilen Brennstoffe und das Bewusstsein um ihre Auswirkungen haben die Entwicklung der erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie, vorangetrieben. Dank der jüngsten Fortschritte auf dem Gebiet der Windkrafttechnik ist das Potenzial in diesem Bereich auch in der Schweiz deutlich angestiegen. Der Ausbau dieser Energieform bringt jedoch einige Unannehmlichkeiten mit sich. Dies gilt vor allem in der Schweiz, wo die Windkrafträder häufig in der Nähe von Wohngebieten errichtet werden. Zu den Nachteilen zählen unter anderem die von Windkraftanlagen erzeugten Schallemissionen. Eine verringerte Lärmbelastung würde die Akzeptanz der Projekte erhöhen und das Potenzial für den Ausbau der Windenergie langfristig erhöhen.

Die von Windkraftanlagen ausgehenden Schallemissionen sind vornehmlich aerodynamischer Natur, wobei bei hoher Geschwindigkeit das Geräusch, das sich an den Hinterkanten der sich drehenden Rotorblätter bildet, als Hauptverursacher gilt. Letzteres wird erzeugt, wenn die Luftschicht unweit der Rotorblätter die Austrittskante passiert. Diese Problematik ist auch Gegenstand experimenteller Versuche mit bisweilen ermutigenden Lösungsansätzen, wie z.B. eine Veränderung der Rotorblätter (Optimierung des Profils oder Ergänzung durch Verzahnungen oder Bürstenabdichtungen am Austritt der Rotorblätter) oder das aktive Betriebsmanagement der Windkraftanlage je nach Uhrzeit und Witterungsbedingungen. CHe

Finalement, le bridage des turbines est d'ores et déjà utilisé, mais il reste un potentiel énergétique et acoustique à gérer plus activement et intelligemment, tel que le fonctionnement de l'éolienne, par exemple, selon les conditions météorologiques.

Les pistes d'amélioration énoncées ci-dessus semblent encourageantes, tout en étant viables, car elles permettent de diminuer le bruit émis tout en limitant la perte d'énergie, voire même en en gagnant. Il faut en effet garder à l'idée qu'une solution de limitation de bruit qui péjore trop la production d'énergie rencontrerait peu de succès.

Références

[1] M. Gérin, P. Gosselin, S. Cordier, C. Viau, P. Quénel, E. Dewailly : Environnement et santé publique – Fondements et pratiques. Edisem, Éditions Tec & Doc, ISBN : 2-89130-193-5, p. 480, 2003.
[2] W.D. Colby, R. Dobie, G. Leventhall, D.M. Lipscomb, R.J. McCunney, M.T. Seilo,B. Sondergaard : Wind Turbine Sound and Health Effects – An Expert Panel Review. Prepared for the American Wind Energy Association and Canadian Wind Energy Association, 2009.
[3] D. Bowdler, G. Leventhall : Wind turbine noise. Multi-Science Publishing Co. Ltd, 2011.
[4] C.J. Doolan, D.J. Moreau, L.A. Brooks : Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. Acoustics Australia Vol. 40, No. 1, pp. 7-13, April 2012. www.academia.edu/1549917/Wind_turbine_noise_mechanisms_and_some_concepts_for_its_control.
[5] M.F. Barone : Survey of techniques for reduction of wind turbine blade trailing edge noise. Sandia National Laboratories, 2011. http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/115252.pdf.
[6] S. Oerlemans : Primary Noise Sources. Chapitre 2 de [3], pp.13-45, 2011.
[7] S. Oerlemans, J.G. Schepers : Prediction of wind turbine noise and validation against experiment. Int. J. Aeroacoustics, Vol. 8, No. 6, pp. 555-584, 2009.
[8] B. Sondergaard : Wind Turbine Noise at the Receiver. Chapitre 4 de [3], pp. 101-120, 2011.
[9] S. Oerlemans, M. Fisher, T. Maeder, K. Kögler : Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations. AIAA Journal 47(6), 2009.
[10] B. Petitjean, R. Drobietz, K. Kinzie : Wind turbine blade noise mitigation technologies. 4th International Meeting on Wind Turbine Noise, Rome, Italy, 11-14 April 2011.
[11] M. Herr : Experimental study on noise reduction through trailing edge brushes. In New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics V, Vol. 92, pp. 365-372, 2006.
[12] Projet Eureka « Active Transformer Quieting », Rapport PSEL, 2000.
[13] Vestas, Sound reduction system, item No. 951428, 2002.

Informations sur l'auteur

Yves Chevillat est ingénieur conseil chez Planair SA. Diplômé en microtechnique et doté de deux CAS (Certificate of advanced studies) en énergies renouvelables thermique et électrique, il a travaillé 10 ans dans la conception horlogère. Depuis 2010, il opère une reconversion professionnelle vers les énergies vertes et se spécialise dans les domaines de la géothermie et de l'éolien. Dans ce dernier, il travaille notamment au support technique de Suisse Eole, dont la partie francophone est assurée par Planair SA.

Planair SA, 2314 La Sagne, yves.chevillat@planair.ch

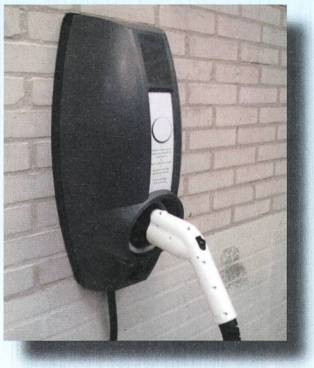
[1] Si des turbulences de grande taille sont présentes dans le vent en entrée de pale, l'approximation ne tient plus : le bruit de traînée sera émis majoritairement perpendiculairement au plan médian de sortie.

be charged

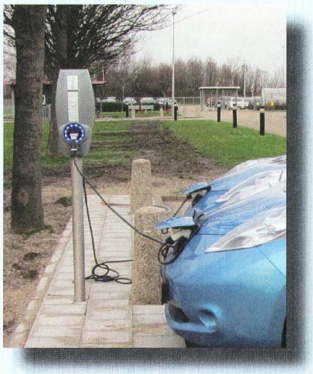
Paré pour e-mobility

Des solutions intelligentes pour toutes les infrastructures

A la maison...



...au travail...



...ou sur la route:

demelectric

Représentation pour la Suisse:

Demelectric SA • Steinhaldenstrasse 26 • 8954 Geroldswil
téléphone +41 (0)43 455 44 00 • fax +41 (0)43 455 44 11
info@demelectric.ch • www.demelectric.ch

Achat auprès des grossistes. Demandez notre documentation.