

Le bruit inaudible des installations éoliennes-

Mesures d'infra-sons sur une éolienne au nord de Hanovre

Lars Ceranna, Gernot Hartmann et Manfred Henger

Office fédéral des géosciences et matières premières (BGR)

Compte rendu B3.11, sismologie

Stielweg 2, 30655 Hanovre

Résumé

Du fait d'une augmentation régulière du nombre d'installations d'éoliennes et de parcs éoliens, leurs émissions de bruit dans le domaine des infra-sons, imperceptibles pour les gens, nécessitent de plus en plus l'enregistrement des variations de micropression correspondantes, par des appareils de mesure très sensibles. Pour quantifier le niveau de pression acoustique, généré par les éoliennes, en fonction de l'éloignement, des mesures d'infra-sons ont été entreprises avec des stations mobiles dans l'axe d'une éolienne. Les résultats des enregistrements ainsi que leur comparaison efficace avec un modèle théorique prédictif de l'importance des sons émis, permettent l'indication d'une distance minimale, nécessaire entre une installation d'éoliennes et des zones habitées. Avec le modèle théorique, les paramètres constructifs des installations éoliennes peuvent être pris en compte. Les connaissances ainsi acquises permettront le choix de lieux d'emplacement convenables pour de nouvelles stations de mesure d'infra-son. Vice versa elles serviront pour les appareils de mesure déjà existants, à déterminer une sphère d'influence pour la construction de nouvelles installations d'éoliennes. C'est le cas, en particulier, pour la station d'infra-son allemande I26DE située dans la forêt bavaroise et la station I27DE, en Antarctique, qui est une partie du système de surveillance international IMS -International Monitoring System - pour la surveillance de l'observation du traité sur l'interdiction des essais nucléaires.

1.Introduction

Dans la population, des critiques sont toujours formulées contre les grandes installations d'éoliennes et leur influence négative possible sur l'environnement. C'est, en particulier, le cas, lors d'agrandissements de ces installations et de leurs interactions spatiales avec des installations qui sont partiellement construites dans le voisinage direct de régions habitées. L'utilisation d'appareils de mesure isolés montre une augmentation des bruits audibles. De plus, le bruit provoqué par le mouvement des pales ne se limite pas au domaine perceptible car, en raison de leur taille et de leur faible vitesse de rotation, une part considérable de

l'énergie est émise à une fréquence au-dessous de 20 hertz, le domaine des infra-sons. Puisque la disposition des éoliennes dépend des conditions locales de vent, un rapport direct existe entre le vent et les bruits émis. Le cas des vents réguliers correspond donc à une émission de bruit permanente, pendant des jours et des semaines, qui peut être en gênante en particulier dans le voisinage direct. Pour des plus grandes distances d'éloignement, les émissions de bruits audibles disparaissent dans le bruit de fond lié à la circulation automobile, l'industrie et les bruits de vent locaux. Ces observations sont vraies pour toutes les installations d'éoliennes indépendamment de leurs paramètres constructifs, avec des puissances de plus de 100 kilowatts et pouvaient déjà être vérifiées dans les années 70 et 80 avec des mesures globales de l'émission de bruit d'éoliennes des types les plus différents. Les mesures étaient faites essentiellement dans le domaine des bruits perceptibles. Au contraire il n'y avait pas de réel intérêt pour les infrasons, puisque ces fréquences ne sont pas perçues par des personnes. En outre, les infra-sons ne pouvaient pas être mesurés assez sûrement avec les microphones de cette époque-là. Aujourd'hui, il est possible de procéder à l'enregistrement des infra-sons avec des détecteurs de pression micro barométrique et les appareils modernes utilisés sont très sensibles et enregistrent les infra-sons avec des grandes longueurs d'onde et un petit amortissement, sur de grandes distances. Du fait de l'exploitation de stations de mesure d'infra-sons par le BGR, il est de son intérêt de savoir sur quelle surface les installations éoliennes produisent des infra-sons et quelle distance minimale doit être respectée entre les éoliennes et les stations de mesure, en particulier pour deux stations de mesure d'infra-sons qui font partie du système de surveillance international (IMS), établi pour l'observation du traité sur l'interdiction des essais nucléaires. Ces stations doivent pouvoir répondre à des exigences importantes par rapport à la sensibilité à de très faibles signaux pour assurer la découverte d'explosions possibles dans l'atmosphère.

Pour connaître l'influence des installations d'éoliennes sur des enregistrements d'infra-sons, une campagne de mesure a été faite au nord de Hanovre avec des stations mobiles de mesure d'infra-sons, face à une éolienne isolée. Comme pour les installations modernes de cette sorte, cette éolienne dispose d'un axe horizontal. Le but des mesures d'infra-sons était d'établir jusqu'à quelles distances des signaux cohérents sont observés et si ceux-ci perturbent la découverte des signaux recherchés, comme le "bruit" ou des signaux de brouillage. Ensuite cette expérience des champs et ses résultats centraux sont présentés ainsi que les mesures et, en comparaison, le niveau de pression de son déduit de la théorie (SPL -Son Pressure Level). Ces valeurs sont données dans tout le rapport en valeur RMS (root mean square) de la pression à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Pour les infra-sons, à l'aide de la comparaison avec le modèle vérifié du calcul de la pression de son face aux éoliennes, on peut évaluer la distance minimale entre les stations de mesure d'infra-sons et des installations d'éoliennes, en fonction de leur nombre et de leurs caractéristiques techniques.

2. Mesure des champs d'infra-son face à une éolienne

En été 2004 le BGR, pendant quatre semaines, à l'aide de stations d'infra-son mobiles, à environ 20 km au nord de Hanovre, a réalisé des mesures d'infra-sons avec le but de déterminer les émissions d'infra-sons produites par une éolienne isolée. Pour diminuer la dépense logistique, le domaine de mesure devait se trouver à proximité de Hanovre. En outre, le choix des mesures face à une éolienne isolée a été fait pour pouvoir entreprendre un classement clair des signaux enregistrés. Avec une distance minimale souhaitée de 5 km entre l'éolienne testée et d'autres éoliennes, du fait de la densité des installations éoliennes en Basse-Saxe (environ 1 par 10 km²), il était difficile de trouver un champ de mesure convenable avec une installation isolée. Enfin, une éolienne de 200 kilowatts du type Vestas V47 se révélait près de Schwarmstedt comme adaptée. La carte de la figure 1 montre la position de l'éolienne et la configuration de mesure.

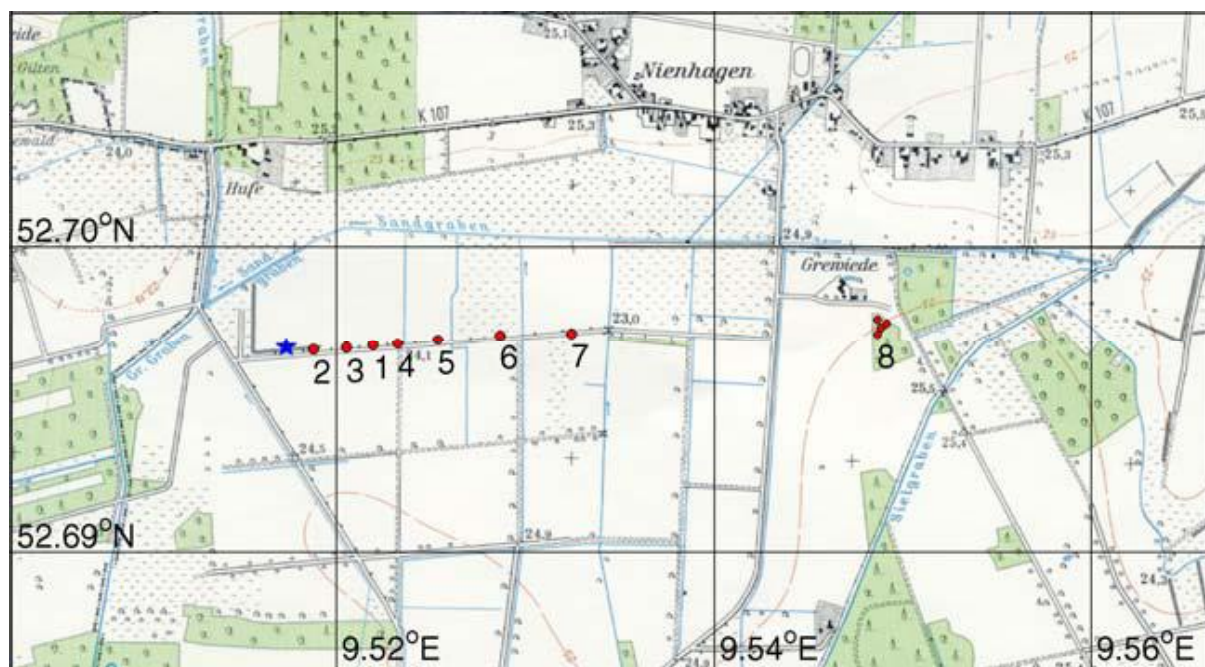


Fig 1 : mesure d'infra-sons d'une éolienne du type Vestas V47 de puissance 200 kilowatts à environ 20 km au nord de Hanovre. Le système d'enregistrement des mesures équipé des microbaromètres MB2000 était installé le long d'un profil d'est d'ouest d'environ 2 km de long. Huit positions sont notés par des cercles rouges et la position de l'éolienne par l'étoile bleue.

Le long du profil d'est en ouest d'environ 2 km de long, huit points de mesure étaient en tout destinés à l'enregistrement des infra-sons générés par l'éolienne. Puisque seulement quatre systèmes mobiles, équipés avec un microbaromètre MB2000 et un convertisseur

analogique-numérique de 24 bits étaient disponibles, les mesures ont été faites dans trois points simultanément : du 7 au 19 juillet aux points 1 à 4, du 19 au 29 juillet aux points 1 et 5 à 7 ainsi que du 29 juillet au 5 août au point 8. A la position (au lieu d'emplacement) appelée finalement, tous les quatre systèmes étaient résumés à un Kleinarray avec un Apertur de 35 m. Puisque n'était pas clair dans le glaci (l'avancée), si peut être mesuré à la distance de 2 km de signaux de brouillage cohérents de la roue de vent, devaient être réduits avec le Kleinarray le bruissement de fond. Par la formation du faisceau lumineux sur la source connue, une amélioration du rapport d'ivresse de signal autour d'un facteur se fait atteindre sous l'acceptation (la supposition) par le bruissement inkohärentem avec quatre Arrayelementen deux. Dans ce cas, le bruit généré par la roue de vent est indiqué comme le signal. Pour atteindre une réduction aussi grande que possible du bruissement de vent gênant, la végétation dense partielle était utilisée le long du chemin rural aux positions (aux lieux d'emplacement) 1 à 7 et un petit bosquet à la position (au lieu d'emplacement) 8.

En général la production du bruit aérodynamique impulsif des installations éoliennes est comparable avec celle des propulseurs, compresseurs et rotors. La différence essentielle se trouve dans le fait que les pales des éoliennes sont beaucoup plus grandes et se déplacent à de beaucoup plus petites vitesses. Pendant la rotation d'une pale, les variations de pression sont produites par des gradients liés au passage devant la tour. Les pulsations acoustiques apparaissent du fait des changements rapides de la charge aérodynamique sur les pales produits en passant ainsi des écoulements d'air turbulents. ...

Les signaux de pression apparaissant avec cela possèdent le caractère impulsif, mais changent cependant en amplitude et en forme de pulsations avec le temps. Selon des mesures de pression faites aux deux faces d'une aile, par Kelley et al. (1985), cet état des choses est dû à ce que les attractions et les forces centrifuges varient temporairement vite dans l'aspiration de la tour et sont différentes ainsi à chaque passage d'aile. Il peut y avoir même une absence complète des signaux de pression (cf. Fig 2).

Au contraire du domaine temporel, où le fait de passer la tour de chaque aile (piano à queue) séparée comme Transiente impulsif avec une distance temporelle ferme (solide) ? Le T que résulte de la quantité d'aile B et la vitesse de rotation O [? Le $T = (O \cdot B)^{-1}$], est reconnu, se représente (se présente) ce signal dans le spectre radioélectrique comme les lignes schmalbandige. Ceux-ci se produisent (se présentent) chez les multiples ganzzahligen des soi-disant harmonieux d'aile (BPH - blade passing harmonic), ceux-ci la valeur inverse de ? Le T est (cf. l'illustration 3).

Projection

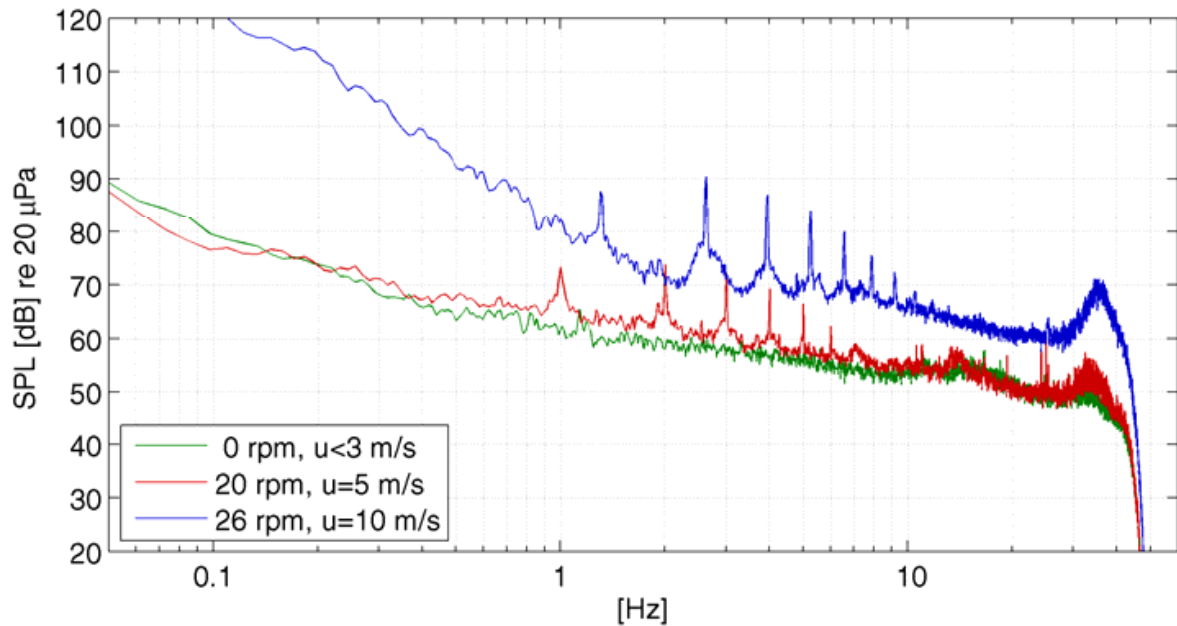


Fig3 : Courbes du niveau de pression de son (SPL) enregistré au lieu d'emplacement 3 à environ 200 m de distance de l'éolienne sur une période de chaque fois 30 minutes aux vitesses du vent diverses d'environ 10, 5 et 3 m/s mesurée à l'axe (bleu, en rouge ou vert). Distinctement les harmoniques des pales sont visibles dont les harmoniques de fréquence 1 hertz sont à 20 U / au minimum (rpm) ou 1.3 hertz à 26 U/au minimum.

Puisque la force de l'impulsion de pression générée est proportionnelle à la quatrième puissance de la vitesse de rotation, les plus grandes installations d'éoliennes modernes sont faites ainsi qu'elles tournent à deux vitesses différentes et sont à l'arrêt au calme plat. Les ailes sont tournées lors de tempêtes et de fortes rafales du vent pour que l'installation ne subisse aucun dommage. Pour l'éolienne Vestas V47 examinée, les deux vitesses de rotation de 20 et 26 U (rpm - revolutions par minute), pour une vitesse de vent à l'axe jusqu'à 8 m/s ou au-dessus de 8 m/s. Dans la Fig 3 sont représentées les mesures faites pour les deux cas de vitesse de rotation ainsi que pour le calme plat. On voit distinctement la montée du bruit de fond avec la vitesse du vent et aussi les émergences claires des harmoniques de fréquences multiples de 1 et 1.3 hertz. D'une façon frappante apparaît un élargissement des pointes d'émergences isolées à la base des premiers harmoniques. Ces élargissements sont une conséquence des mesures faites dans un champ, c.-à-d avec des distances à la source de moins que cinq longueurs d'onde. L'harmonique n'est pas encore complètement formée à cette distance et, de ce fait, des vibrations existant dans la pale et dans la tour participent au bruit mesuré.

L'analyse des fréquences sur une période de 3 jours dans la Fig 4 indique qu'une corrélation claire existe entre la vitesse de rotation, la vitesse du vent et le niveau de pression de son enregistré.

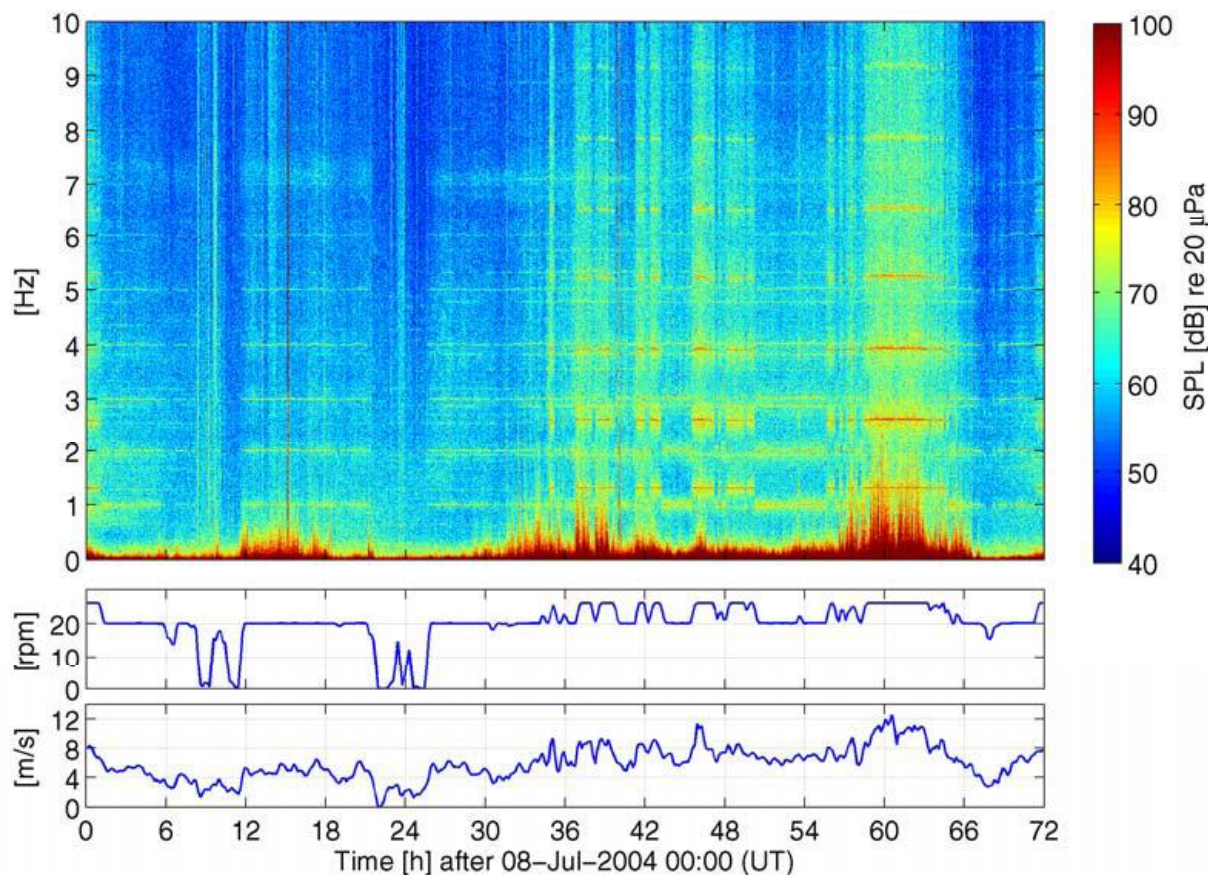


Fig 4 : Courbes de fréquence du niveau de pression de son (SPL) enregistré codé de couleur et limité à 100 dB au lieu d'emplacement 3, à environ 200 m de distance de l'éolienne sur une période de 72 heures. Les deux courbes inférieures montrent la rotation et la vitesse du vent à la hauteur de l'axe.

Le mesurage des champs a en tout manifesté, comment l'émission de l'infra-son est forte par des installations éoliennes d'autant plus qu'à des fréquences au-dessus de 10 hertz avec les détecteurs de pression MB2000 aucuns harmonieux n'étaient mesurés. Donc, c'est pas sur le microbaromètre en arrière amèment qui a supérieur 3-dB le point à 27 hertz, mais à l'accueil(à la prise de vues) dans étendue avec quatre tuyaux poreux avec chaque fois 2 m de longueur et son(leur) étalage sur la terre(le sol) et non comme autrement à des mesurages dans le domaine perceptible habituellement dans environ 2 m de hauteur. Plus loin la végétation agit en assourdissant sur de plus hauts harmonieux (cf. Kelly et al., en 1985).

L'élargissement des impulsions acoustiques générées par la roue de vent montre une dépendance azimutale. Le maximum de l'amplitude se trouve dans et vers la direction du vent du vent; au contraire verticalement au niveau de rotation des ailes(des pianos à queue), l'amplitude est humiliée autour d'un facteur 3 à l'égard du maximum. Avec cela les phases des impulsions entre le vent contraire et vent de dos se distinguent autour de 180 °, l'un pour une source avec le caractère de dipôle la valeur typique. Donc, sur l'exploitation des résultats de mesure, cela n'a pas d'influence, puisque pendant les mesurages presque

exclusivement le vent de la direction occidentale ou orientale soufflait et ne joue la phase au spectre d'amplitude aucun rôle (rouleau).

3. Estimation de la pression de son des harmonieux

Une rangée des travaux était faite au sujet de l'estimation le Magnitude des harmonieux d'aile par des roues de vent. Viterna (1982) donne une méthode compacte et confortable pour compter le niveau de pression de son des harmonieux comme la fonction de ses paramètres géométriques. Le commencement base essentiellement sur des travaux de Sears (1941) Lawson et (1970) et prend en considération les forces d'aile aérodynamiques instables. L'effet de force temporairement variable sur une aile (sur un piano à queue) est présenté (représenté) par Fourierkoeffizienten complexe, corrige avec la fonction de Sears pour déterminer (destiner) les effets aérodynamiques à l'aile (au piano à queue) à l'ombre de tour. Viterna (1982) f reçoit en tout Viterna reçoit en tout (1982) expressions suivantes pour le niveau de pression de son temporairement gemittelten P_n des harmonieux d'aile n-ten d'une roue de vent avec l'axe (essieu) horizontal : $P_n = P_m \cos(\alpha) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} (x - Re) \right)$ (Gl. 1)

Avec cela, le m est l'index (indice) des harmonieuses de forces d'aile ($m = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots$), n l'index (indice) le Schalldruckharmonischen ($n = 1, 2, \dots$), P_n des rms-niveaux de pression de son des harmonieux n-ten, $k_n = nB / c_0$ le nombre d'onde, B est la quantité des ailes (des pianos à queue) ainsi qu'O la rotation et c_0 la vitesse du son. J_x est le Besselfunktion de la première sorte (manière) et de l'ordre x-ter avec le $x = nB m$, Re est le rayon d'aile efficace, d la distance au moyeu de rotor? Et α Sont l'azimut et Inzidenzwinkel à l'écouteur; enfin, sont et le Fourierkoeffizienten complexe de la poussée et du couple de rotation. Au calcul le Fourierkoeffizienten est à faire attention qu'aux données théoriques et aussi empiriques à la conséquence se réduit l'Anströmgeschwindigkeit de l'air à l'ombre de tour à environ 80% et que l'ombre de tour un segment de district de 30 ° embrasse (contient) (cf. Viterna en 1982, Hubbard et Sheppard en 1991). TmaQma

L'illustration 5 montre une comparaison entre les niveaux de pression de son comptés et mesurés 2 harmonieux d'Aile pour tout le domaine de distance d'environ 2 km et les deux vitesses de rotation sont considérées. Les valeurs mesurées résultent d'une définition de valeur moyenne sur les espaces temporaires dans lesquels le vent de la direction occidentale ou orientale soufflait. 2. Les harmonieux était choisi (voté), puisque elle est la plus forte d'amplitude pour la roue de vent examinée et pouvait être enregistrée ainsi encore au point de mesure très loin. Une bonne conformité entre les valeurs mesurées et théoriques pouvait être atteinte jusqu'au 1er point de mesure dans environ 100 m de distance. Cette différence est à ramener qu'ici le mesurage des premiers harmonieux résultait dans un proche champ avec des distances plus petit qu'une longueur d'onde et l'estimation théorique qui représente (présente) une pure formulation lointaine de champ, ces valeurs surestime, peut-être.

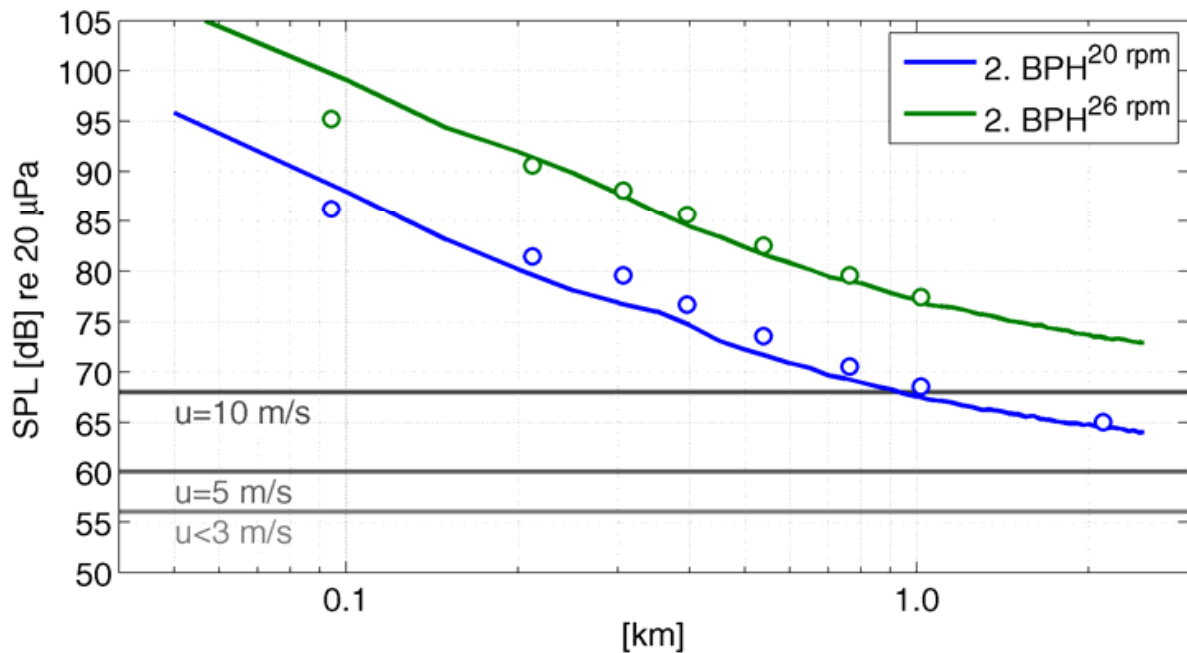


Fig 5 : comparaison entre le théorique (-) et mesuré (o) du niveau de pression de son (SPL) du 2° harmonique (BPH) des pales aux lieux d'emplacement 1 à 8 pour les deux vitesses de rotation de 20 et 26 rpm , en bleu et vert. Les lignes horizontales montrent le niveau du bruit de fond à environ 2-3 hertz pour les vitesses du vent différentes : inférieure à 3, environ 5 et 10 m/s, lesquelles correspondent les vitesses de rotation

Puisque il s'agit aux chers P_n théoriques du pur signal de pression de la roue de vent, le bruissement de fond moyen est additionné aux vitesses du vent correspondantes aux valeurs théoriques. Plus loin les conditions météorologiques locales et la topographie dans le domaine de mesure ont une influence sur l'élargissement de son si bien que soient ajoutés sur la base de réfractons un autre 3 à 6 dB P_n . Cette valeur se trouve dans l'accord avec des observations de Viterna (1982) et est valable (considérée) également pour de plus hauts harmoniques dans le domaine perceptible. C'est manifesté pour le point de mesure 2 typiquement dans l'illustration 6.

La comparaison couronnée de succès indique en tout entre les niveaux de pression de son théoriques et mesurés d'une installation éolienne avec l'axe(essieu) horizontal que la formulation de Viterna est valable (considérée) dans l'équation (1) pour le pur son (argile) avec les corrections par rapport au bruissement de fond ainsi qu'au renforcement conditionné par l'élargissement du signal en plein air le terrain aussi pour l'infra-son. Avec cela une estimation de l'émission de bruit peut être entreprise par des turbines de vent dans la dépendance de ses(leurs) paramètres constructifs et géométriques.

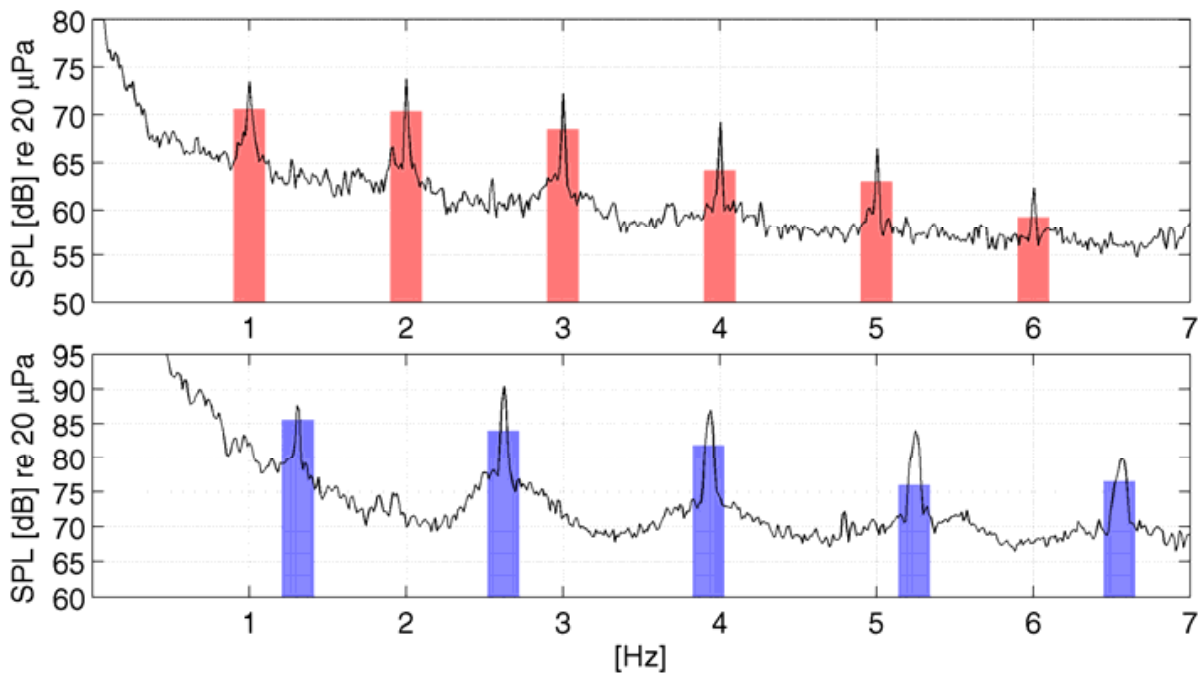


Illustration 6 : Spectrale la représentation du niveau de pression de son (SPL) enregistré à la position (au lieu d'emplacement) 3 dans environ 200 m de distance à la roue de vent ainsi que les valeurs théoriques adéquates qui sont corrigés seulement autour du bruissement de fond, non, donc, autour de l'effet de température et de topographie local. Dans le supérieur art graphique, 20 sont considérés rpm et dans le 26 inférieur.

4. Estimation de la pression de son de grandes éoliennes

La Fig 5 montre qu'une distance de 2 km est suffisante, autour des stations d'enregistrements d'infra-sons, pour que les éoliennes isolées ne soient pas gênantes. Ainsi le bruit émis par l'éolienne se trouve à cette distance dans le domaine du bruit du vent et n'est plus gênant par conséquent aux fréquences basses de près de 2 hertz. Mais ce n'est valable que pour des installations éoliennes de cette puissance et taille, non pour de plus grandes installations), comme elles sont souvent construites aujourd'hui. Le but de ces grandes éoliennes consiste à obtenir, à plus grande hauteur, des conditions de vent prédominantes plus constantes et meilleures pour produire plus de courant. Les installations éoliennes modernes atteignent déjà des hauteurs à l'axe de plus que 100 m, si bien que la portée des impulsions générées grandit nettement. Ci après certaines installations éoliennes dont les caractéristiques sont listées dans le tableau 1, sont examinées par rapport à leurs émissions d'infra-sons.

Tableau 1 : inventaire des caractéristiques des installations d'éoliennes tri pales avec axe horizontal sur les derniers 25 ans.

Année de construction	Hauteur de moyeu [M]	Longueur des pales[m]	Puissance [kW]	Vitesse de rotation rpm]
1980	30	15	30	32
1985	40	20	80	28
1990	50	30	250	24
1995	78	46	600	20
2000	100	70	1500	16
2005	120	115	5000	12

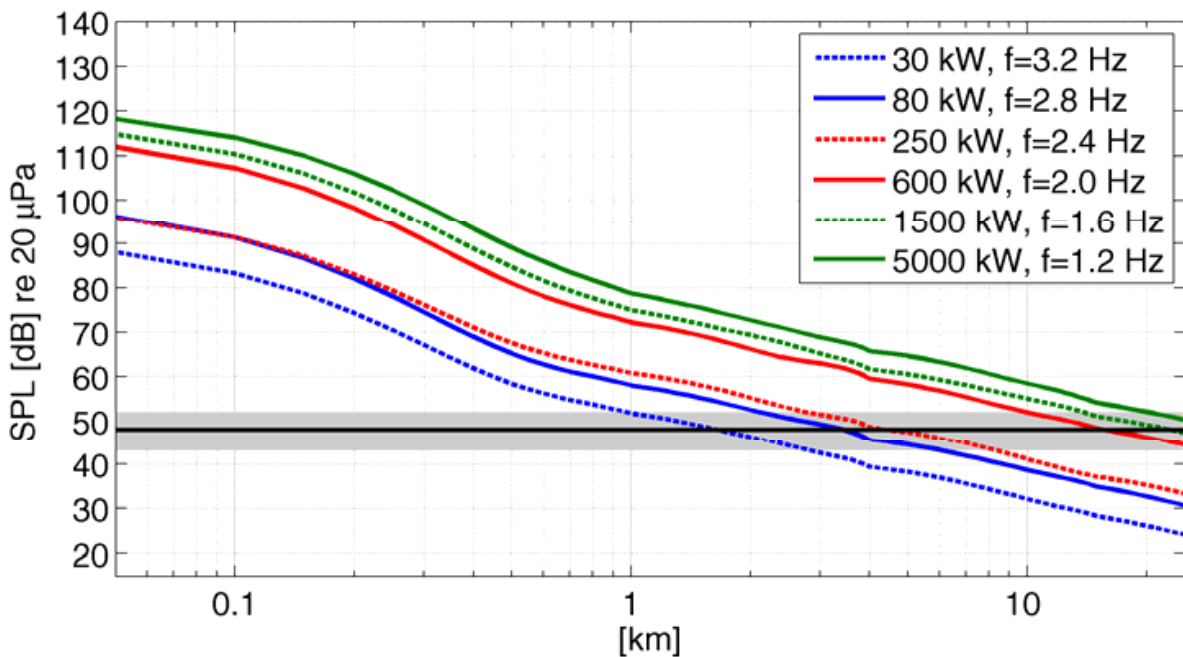


Fig 7 : cours du niveau de pression de son (SPL) émis avec la distance à la source pour la 2^e harmonique de pale. Les caractéristiques des éoliennes sont à retirer du tableau 1. Le domaine gris surligné donne le bruit de fond entre 1 et 3 hertz à la station d'infra-son I26DE dans la forêt bavaroise.

La Fig 7 montre les courbes théoriques du niveau de pression de son du 2^e harmonique de pale, en fonction de la distance, issu des éoliennes dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 1. Essentiellement deux séries de courbes se distinguent, proches les unes des autres. On note que la caractéristique décisive est moins la puissance électrique produite que la hauteur de l'axe de l'éolienne. Ainsi les éoliennes modernes avec des hauteurs d'axe supérieures à 80 m et des puissances d'au moins 600 kilowatts sont en mesure de générer un signal d'infra-son entre 1 et 2 hertz dont le niveau se trouve à environ 10 km de distance encore au-dessus du bruit de fond. Le niveau du bruit de fond est considéré pour la station de mesure d'infra-sons I26DE sur le Sulzberg dans la forêt bavaroise. Bowman et al. (2005) ont fait une comparaison du niveau de sensibilité de 21 stations d'infra-sons dont 16 I26DE qui appartiennent au réseau IMS. Le bruit de fond moyen

entre 1 et 2 hertz se trouve à environ 54 dB qui correspond à la frontière supérieure du domaine gris surligné dans la Fig 7.

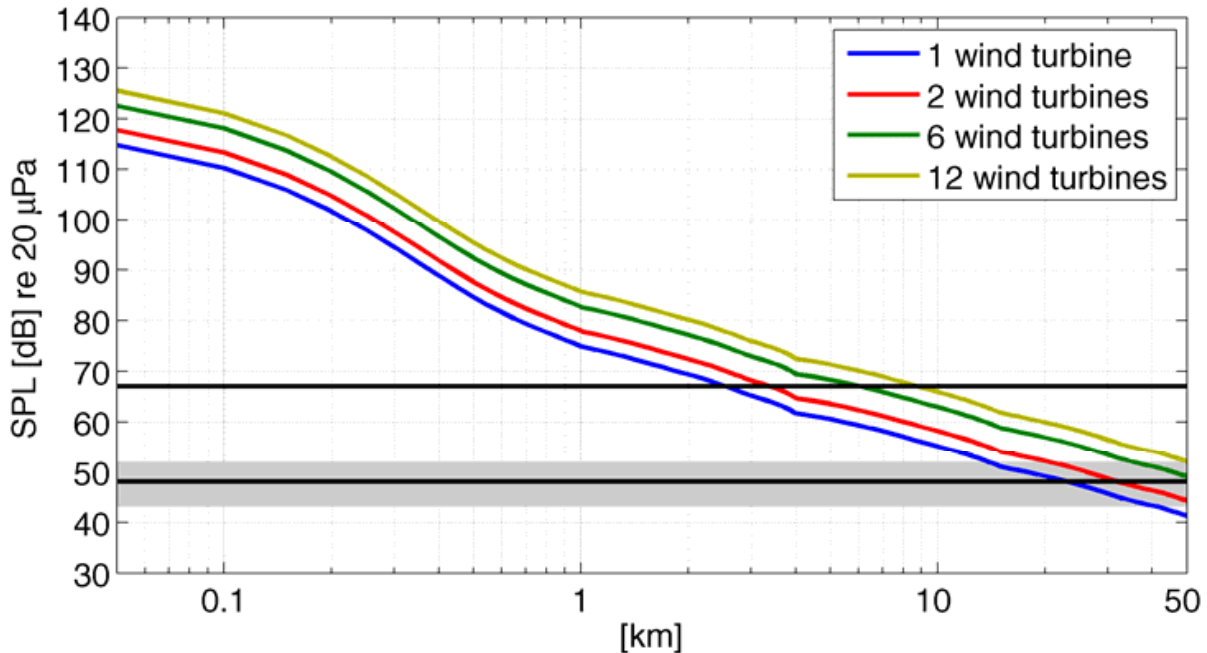


Fig 8 : courbes du niveau de pression de son (SPL), en fonction de la distance, du 2° harmonique de pale d'un parc éolien contenant 1, 2, 6 et 12 éoliennes de 600 kilowatts de puissance. Le domaine gris surligné donne le bruit de fond à la station I26DE et la ligne à environ 67 dB correspond aux exigences minimales au Rauschbedingen pour des stations d'infra-son IMS.

Pour illustrer l'influence d'un parc éolien par rapport à celle d'une éolienne isolée, la Fig 8 fait apparaître les niveaux comparés de bruit émis, pour des éoliennes de 600 kilowatts. Pour une variable de L, correspondant au nombre d'éoliennes, le niveau de son est augmenté par le facteur $20 \cdot \log_{10}(L^{0.5})$ [dB]. De ce fait, le niveau de pression de son des harmoniques à grande distance augmente proportionnellement à la racine du nombre d'éoliennes. Ce rapport connu de la théorie de Attay était déjà noté par Steinberg (1965). Dans le cas d'un parc éolien avec 12 éoliennes de 600 kilowatts, la distance pendant laquelle le son émis se trouve encore au-dessus du bruit de fond, à la station I26DE, est d'environ 50 km.

A l'estimation on suppose que toutes les roues de vent courent (passent) dans la phase et produisent un modèle d'interférence constructif qui n'est pas, habituellement, donc, le cas. A des parcs de vent, cet effet est empêché consciemment dans lequel les roues séparées avec les positions de phase diverses tournent. Mais cette mesure a seulement une petite influence sur la réduction de l'énergie émise dans le champ lointain. Ainsi s'avéraient les

examens sismiques de Laughlin et al. (2004) A des dynamitages de carrière que l'interférence constructive des ondes de surface dans le champ lointain presque non influencé des temporels De la même manière l'équivalent est la considération des ondes de surface sismiques avec l'élargissement de son accepté ici d'une onde dirigée à la surface(l'interface). Cela se forme ainsi dans le champ lointain un modèle d'interférence constructif dont l'énergie est presque indépendamment des positions de phase des sources. Au contraire l'équation (1) met un amortissement géométrique de $1 / d$ au fond(à la raison). Cependant, avec cela la topographie et végétation ne sont pas prises en considération. Le plus dernier est en raison de la longueur d'onde de plus que 100 m et du fait que des installations éoliennes et aussi stations d'infra-son sont toujours construites sur des hauteurs, à négligent. Au contraire l'illustration 9 indique qu'un achat(enlèvement) avec $1 / d$ n'est pas justifié nécessairement.

Pour le cas de l'un par le vent et la température du guide d'ondes conditionnel dans la troposphère, l'absorption géométrique se trouve entre 10 et 25 km au-dessous de $1 / d$. Avec cela, un guide d'ondes se distingue par une vitesse de phase dans l'atmosphère qui est plus qu'à la surface(l'interface). En outre, il permet un élargissement de son presque libre de perte, comme l'élargissement de la lumière dans un câble de fibre de verre. A de plus grandes distances, l'amortissement géométrique est plus fort que $1 / d$ qui s'applique toujours en cas d'une vitesse de phase constante. Seulement pour les premiers kilomètres vote l'acceptation(la supposition) d'un amortissement de $1 / d$, comment les virages d'achat d'amplitude synthétiques de la simulation numérique à l'aide du Reflektivitätsmethode (par exemple des meuniers en 1985) indiquent .d Puisque, donc, les conditions de température et de vent stables sur des distances de beaucoup de kilomètres sont improbables dans la troposphère inférieure et à la topographie le guide d'ondes peut interrompre, le virage vert décrit dans Corriger de l'illustration 8. Ainsi devraient être retirés à une distance de 20 km 8 dB et à 50 km même 27 dB. Par conséquent, la distance minimale pour un enregistrement d'infra-son paisible entre la station I26DE et un 12-elementigen réduit se le parc de vent de 50 km à environ 20 km, puisque maintenant à cette distance le niveau de pression de son émis se trouve au-dessous du bruissement de fond. Si les conditions de bruit minimal exigées d'une station d'infra-son IMS sont mises au fond(à la raison) qui peut faire le hertz dans le spectre dense d'exécution après le niveau de pression de son du bruissement de fond entre 1.0 et 4.0 hertz au maximum 67 dB (du 10 au 4 Pa²/), une distance minimale d'environ 8 km devrait être respectée entre le parc de vent 600 kilowatts d'installations éoliennes et installation de mesure d'infra-son. Pour le niveau d'ivresse moyen de 54 dB tous de Bowman et al. La distance au moins 15 km ferait au contraire (2005) stations d'infra-son examinées. Avec cela cette valeur de 54 dB reflète l'oppression d'ivresse des annexes d'infra-son IMS modernes. Il est présenté ainsi un élément d'évaluation réaliste l'état(le stand) actuel de la technique de mesure d'infra-son pendant que l'exigence minimale de 67 dB pour la supérieure limite de l'inquiétude sur laquelle est fondé dans les années 60 aux expériences faites.

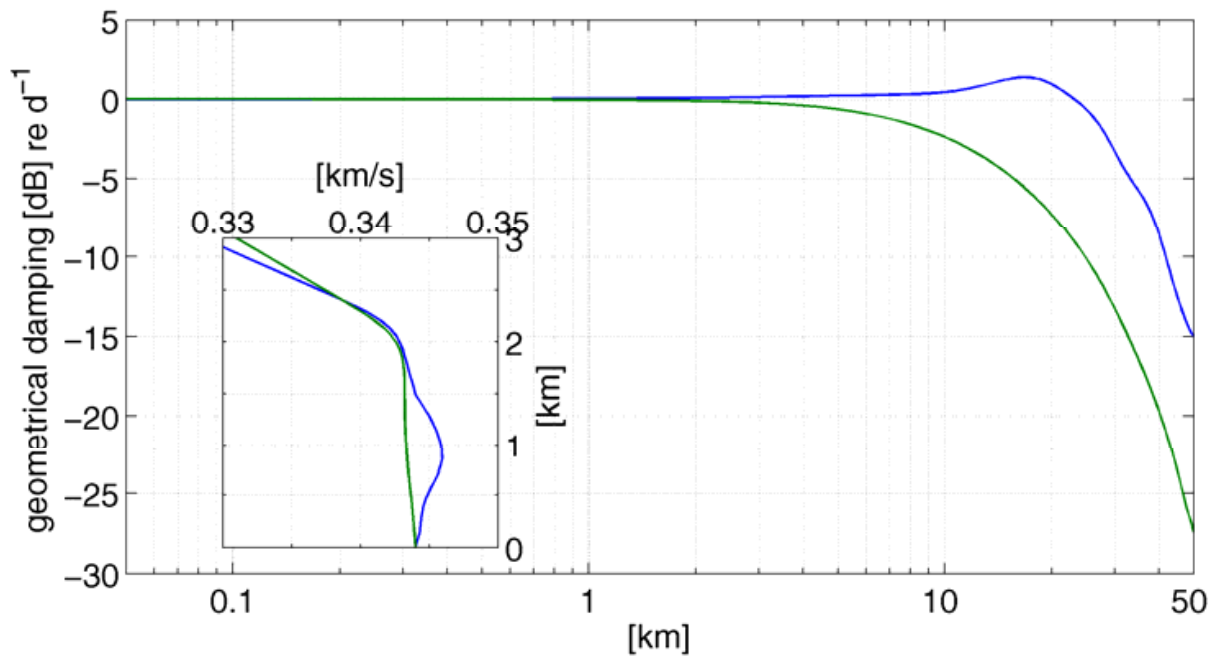


Illustration 9 : cours de l'absorption géométrique cumulable [dB] avec la distance dans le rapport à $1/d$ pour deux modèles de vitesse divers qui sont présentés (représentés) dans la petite projection. Un modèle montre un guide d'ondes proche de surface et l'autre (le différent) une vitesse de phase presque constante à l'intérieur des premiers 2 km (bleu ou vert).

Après les résultats des études menées avec des détecteurs d'infra-son très sensibles à l'égard des installations éoliennes, pour la distance minimale à respecter, nous ferons encore une courte remarque sur la perception humaine des infra-sons produits par ces matériels. La Fig 10 montre la variation de la capacité auditive des personnes aux très basses fréquences selon Møller et Andresen (1984).

Il existe un grand nombre de travaux scientifiques qui s'occupent des gênes acoustiques des éoliennes dans le domaine audible. Ainsi la gêne nocturne des habitants décrite, par exemple, Van den Berg (2004), pour un parc éolien éloigné d'environ 1.5 km. Des mesures systématiques par rapport au niveau supportable ont été faites en Suède par Pederson et Halmstad (2003) ainsi que par Pederson et Persson Waye (2004). Les résultats indiquent que jusqu'à une distance de 2 km il y a un niveau élevé de bruit perçu, qui diminue nettement avec la distance. Pour les infra-sons, inaudibles, il n'y a eu aucun examen de ce type, les estimations étant seulement théoriques. Si les résultats de notre travail ainsi que les courbes de la Fig 10 sont prises en compte, aucune contre indication n'apparaît pour des habitations proches des installations éoliennes, dans le domaine des infra-sons, inférieur à 20 hertz, car sur une distance de 1 km, une éolienne de 5MW produit seulement un niveau de pression de son maximum de 80 dB. C'est seulement à des fréquences supérieures à 15 hertz et pour des parcs éoliens plus importants, qu'une perception du son est possible sur cette distance.

5. Discussion et conclusions

Les distances minimales théoriquement évaluées entre des installations éoliennes et les stations de mesure des infra-sons paraissent importantes avec jusqu'à 20 km pour un parc éolien de 12 machines de 600 kilowatts. D'ailleurs, des enregistrements réalisés à la station d'infra-son IMS I57US dans le Pinon Flat californien de sud indiquent que le bruit cohérent émis à environ 35 km par le parc éolien, le troisième en importance en Californie, est encore détectable à cette distance (Arrowsmith et Hedlin, en 2005). Ainsi les distances indiquées plus haut sont réalistes. En général, le niveau de détection des stations concernées est efficacement augmenté pour les signaux de profil recherché, seulement si les bruits parasites arrivent de la même direction, à vitesse semblable ainsi qu'avec une amplitude comparable et des fréquences comme des signaux de brouillage. Des expériences de ce type ont été faites pendant les mesures à Schwarmstedt. Ainsi il a été possible, malgré l'émission de bruit de l'éolienne, de détecter l'explosion d'un oléoduc de gaz situé près de Bruxelles, le 30 juillet 2004 (cf. Evers et al., en 2006).

La mesure de la perte des possibilités de détection d'une station de mesure des infra-sons par la présence d'un parc éolien à seulement quelques kilomètres peut être estimée, selon IGADÉ, à l'exemple de la station de mesure des infra-sons au nord de Brême. Un appareil 4-élémentaire Array avec Apertur d'environ 800 m est en service depuis mars 2005, éloigné seulement d'environ 4 km d'un petit parc éolien. Pendant la planification de la construction de la station en 2004 il n'y avait là qu'une éolienne isolée et, entre-temps, il y en a eu quatre. Dans la Fig 11 sont représentées la position de la station de mesure des infra-sons et la position des éoliennes, avec un histogramme polaire des conditions de détection automatique à l'aide de l'algorithme PMCC (Cansi, en 1995).

L'émission de bruit du parc éolien apparaît dans l'image droite distinctement comme l'accumulation de la prise de relèvement des signaux cohérents avec un azimut de station de 220 °. Les éoliennes amènent ainsi un amoindrissement des possibilités de détection pour un segment d'azimut qui est considérable pour IGADÉ, d'environ 10 °. C'est valable avant tout du fait du bruit de fond qui s'élève lors de vents forts, qui s'ajoute avec le niveau de pression de son issu du parc éolien. Cela concerne, non seulement la direction des éoliennes mais aussi l'ensemble des azimuts, car cela devient à chaque fois le plus fort signal de bruit détecté chaque date. Ainsi, pour IGADÉ, les signaux de plus faibles amplitudes sont recouverts par le bruit indépendamment de leur azimut. Ce résultat indique que l'observation d'une distance minimale vis-à-vis des stations de mesures des infra-sons est une condition essentielle à des installations d'éoliennes, avant tout pour les stations du système de surveillance international.

Les procédés nécessaires sont disponibles pour la définition de cette distance. Essentiellement les mesures face à une éolienne isolée y ont contribué au nord de Hanovre, les expériences faites à une autre station de mesures des infra-sons et le modèle théorique

pour l'estimation du niveau de pression de son émis par les éoliennes, comme l'étude de leurs caractéristiques techniques, qui pouvaient être confirmées dans le cadre de ce travail sur les infra-sons. Habituellement, une distance d'environ 20 km doit être respectée entre la station de mesure et le parc éolien le plus proche, pour garantir un enregistrement paisible et la détection des signaux acoustiques recherchés. Si un parc éolien dépasse la taille de douze éoliennes de 600 kilowatts et une puissance électrique de 7 MW, la distance doit être augmentée. Dans ce cas, à cause de l'amortissement du son, une distance de 25 km pour chaque type de parc éolien paraît suffisante.

Literatur

- Arrowsmith, S.J., and M.A.H. Hedlin (2005), Observations of infrasound from surf in southern California, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09810, doi: 10.1029/2005GL022761
- Bowman, J.R., G.E. Baker, and M. Bahavar (2005), Ambient infrasound noise, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09803, doi: 10.1029/2005GL022486
- Cansi, Y., (1995), An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1021-1024
- Evers, L.G., L. Ceranna, H.W. Haak, A. Le Pichon, and R.W. Whitaker, (2006), A seismo-acoustic analysis of the gas-pipeline explosion near Ghislenghien in Belgium, *Bull. Seis. Soc. Am.*, accepted to be published
- Hubbard, H.H., and K.P. Shepherd (1991), Aeroacoustics of large wind turbines, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, 2495-2508
- Kelly, N.D., H.E. McKenna, R.R. Hemphill, C.L. Etter, R.L. Garelts, and N.C. Linn (1985), Acoustic noise associated with MOD-1 wind turbines: its source, impact, and control, *SERI TR*, 635-1166 (February, 1985)
- Kelly, N.D., H.E. McKenna, E.W. Jacobs, R.R. Hemphill, and N.J. Birkenheuer (1987), The MOD-2 wind turbine: aeroacoustical noise sources, emission and potential impact, *SERI TR*, 217-3036 (April, 1987)
- McLaughlin, K.L., J.L. Bonner, and T. Barker (2004), Seismic source mechanisms for quarry blasts: modelling observed Rayleigh and Love wave radiation patterns from a Texas quarry, *Geophys. J. Int.*, 156, 79-93, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02105.x
- Møller, H., and J. Andresen (1984), Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies, *J. Low Freq. Noise Vib.*, 2, 78-87
- Müller, G., (1985), The reflectivity method: A tutorial, *J. Geophys.*, 58, 153-174
- Pederson, E., and K. Persson Waye, (2004), Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship, *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, 3460-3470, doi: 10.1121/1.1815091
- Pederson, E., and H. i Halmstat, (2003), Noise annoyance from wind turbines – a review, *Swedish Environmental Protection Agency*, Report 5308 (August, 2003)
- Steinberg, B., (1965), Large aperture teleseismic array theory, ARPA-Report, First LASA Systems Evaluation Conference , 140 (September, 1965)
- Van den Berg, G.P. (2004), Effects of the wind profile at night on wind turbine sound, *J. Sound Vib.*, 277, 955-970, doi: 10.1016/j.jsv.2003.09.050

Viterna, L.A. (1981), The NASA-LERC wind turbine noise prediction code, *NASA CP*, 2185
(February, 1981)