anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

Connaître, évaluer, protéger

Evaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Mars 2017 Édition scientifique

anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

Connaître, évaluer, protéger

Évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Mars 2017 Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 14 février 2017

AVIS
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à l'expertise « Évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 4 juillet 2013 par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) pour la réalisation de l'expertise suivante : évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Le développement des éoliennes comme source d'énergie électrique renouvelable a conduit à s'interroger sur leur potentialité à produire des sons basses fréquences (20 Hz à 200 Hz) et des infrasons (inférieurs à 20 Hz) et sur leurs éventuelles conséquences pour la santé.

En mars 2006, l'Académie nationale de médecine a considéré, dans un rapport concernant le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'être humain, que l'impact sonore des parcs éoliens était comparable à celui des aéroports, des infrastructures de transports ou des usines. Ce rapport recommandait une classification des parcs éoliens en « zone industrielle » et une distance minimale d'implantation de 1 500 mètres des habitations.

Saisie alors par la DGPR et la DGS pour étudier les impacts sanitaires du bruit engendré par les éoliennes, l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse) avait conclu, dans son rapport intitulé « Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes » publié en mars 2008, que les émissions sonores des éoliennes n'avaient pas de conséquences sanitaires directes tant au niveau de l'appareil auditif que des effets liés à l'exposition aux basses fréquences et aux infrasons. Ce rapport considérait également que l'énoncé systématique d'une distance minimale d'éloignement de 1 500 mètres, sans prendre en compte l'environnement (notamment topographique) du parc éolien, ne semblait pas pertinent.

La réglementation française relative aux éoliennes a depuis été modifiée, avec l'introduction d'une distance minimale d'implantation des éoliennes de 500 mètres au-delà de toute habitation, puis le classement des parcs éoliens dans le régime des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE, arrêtés du 26 août 2011). Ces textes considèrent les bandes d'octave de 125 à 4 000 Hz. Les très basses fréquences et les infrasons, plus difficiles à mesurer, ne sont actuellement pas pris en compte.

Comme l'a mis en évidence une revue des réglementations françaises et étrangères produite en 2014 par le Centre d'information et de documentation sur le bruit (CIDB), à la demande de l'Anses, il n'existe pas actuellement de réglementation harmonisée au sein de l'Union européenne spécifique au bruit des éoliennes ni aux infrasons et basses fréquences de toutes autres sources sonores. Seuls quelques référentiels nationaux incluent des dispositions spécifiques aux parcs éoliens. La plupart des plaintes recensées liées à des bruits basses fréquences correspondent à des situations d'exposition à l'intérieur des bâtiments. Certains pays[1] ont ainsi développé des recommandations relatives à l'exposition aux bruits basses fréquences et aux infrasons à l'intérieur des habitations, le plus souvent au voisinage des installations industrielles.

En France, des plaintes de riverains concernant le bruit des éoliennes ont été signalées à la DGPR par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

C'est dans ce contexte que l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (Anses) a été saisie le 4 juillet 2013 par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) afin d'évaluer les effets sur la santé des basses fréquences et des infrasons dus aux parcs éoliens. La demande exprimée portait en particulier sur les points suivants :

- conduire une revue des connaissances disponibles en matière d'effets sanitaires auditifs et extra-auditifs dus aux parcs éoliens, en particulier dans le domaine des basses fréquences et des infrasons ;
- étudier les réglementations mises en œuvre dans les pays, notamment européens, confrontés aux mêmes problématiques ;
- mesurer l'impact sonore de parcs éoliens, notamment de ceux où une gêne est rapportée par les riverains, en prenant en compte les contributions des basses fréquences et des infrasons ;
- proposer des pistes d'amélioration de la prise en compte des éventuels effets sur la santé dans la réglementation, ainsi que des préconisations permettant de mieux appréhender ces effets sanitaires dans les études d'impact des projets éoliens.

2. METHODE D'EXPERTISE

Organisation de l'expertise

L'Anses a confié l'instruction de cette saisine au groupe de travail « Effets sur la santé des basses fréquences et infrasons dus aux parcs éoliens » rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

Ce groupe de travail, constitué à la suite d'un appel public à candidatures, a réuni des experts, sélectionnés pour leurs compétences et leur indépendance, dans des domaines scientifiques et

[1] Par exemple, le Danemark a intégré officiellement la prise en compte des basses fréquences dans sa réglementation sur l'impact sonore des parcs éoliens. Mais les valeurs d'isolement prises pour le calcul des niveaux d'exposition aux basses fréquences sonores à l'intérieur des habitations sont controversées.

techniques complémentaires. Il s'est réuni 27 fois en réunions plénières (à l'Anses) entre avril 2013 et octobre 2016.

Plusieurs auditions de parties prenantes et personnalités scientifiques se sont tenues pendant ces réunions, afin de permettre au groupe de travail de disposer de toutes les informations utiles et nécessaires pour la conduite de l'expertise.

Enfin, deux travaux complémentaires ont été sollicités, dans le cadre de conventions de recherche et développement financées par l'Anses :

- la réalisation, par le CIDB, d'une revue de la réglementation en vigueur relative aux bruits de basses fréquences, s'appliquant aux éoliennes en France et à l'international ;
- l'analyse du contexte socio-économique entourant l'implantation des parcs éoliens par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement[2].

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport et la synthèse d'expertise collective produits tiennent compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise ».

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

Description de la méthode d'expertise

Campagnes de mesures d'exposition au bruit des éoliennes

Afin de compléter les données issues de la littérature scientifique sur l'exposition aux infrasons et basses fréquences dus aux parcs éoliens, l'Anses a fait réaliser des campagnes de mesures de bruit (incluant basses fréquences et infrasons) à proximité de plusieurs parcs éoliens. Ces mesurages acoustiques ont été réalisés par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema[3]).

La sélection des sites (parcs éoliens) ayant fait l'objet des campagnes de mesures a été effectuée au regard d'un compromis entre le nombre de sites à inclure dans l'étude et le niveau d'analyse souhaité pour chacun de ces sites.

Le protocole des campagnes de mesures a été construit de manière à disposer, pour chaque parc éolien étudié :

- de l'ensemble des classes de vent possibles (catégories de vitesses et de directions du vent) ;
- de l'accès à quatre points de mesure simultanés :

[2] Unité mixte de recherche n° 8568 du Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

[3] Le Cerema est un établissement public, créé en 2014 pour apporter un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement. Il regroupe les huit ex-Centres d'études techniques de l'équipement (CETE), l'ex-Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Certu), l'ex-Centre d'études techniques, maritimes et fluviales (CETMEF), et l'ex-Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Setra).

- à la distance minimale d'éloignement réglementaire (500 m) ;
- en façade et à l'intérieur d'une habitation (de préférence la plus proche possible d'une éolienne) ;
- et à proximité de la source, afin de caractériser l'émission sonore des éoliennes.

Au terme d'une réflexion confrontant plusieurs critères d'intérêt listés par les experts du groupe de travail et les caractéristiques connues des parcs éoliens en France, trois sites ont été sélectionnés, dont les caractéristiques sont les suivantes :

site 1 : parc constitué des plus grandes (diamètre des pales) et puissantes éoliennes en fonction en France aux dates de cette période d'analyse. Ces aérogénérateurs sont théoriquement ceux émettant le plus d'infrasons et basses fréquences, du fait de leurs grandes dimensions, et constituent une préfiguration des futures éoliennes de plus de 3 MW (période de mesure : du 12/10/2015 au 19/10/2015 ; 1 000 échantillons de 10 min exploitables) ;

site 2 : parc de configuration « classique » faisant l'objet de plaintes (période de mesure : du 30/06/2015 au 06/07/2015 ; 887 échantillons de 10 min exploitables) ;

site 3 : parc de configuration « classique » ne faisant pas l'objet de plaintes (période de mesure : du 23/03/2015 au 27/03/2015 ; 541 échantillons de 10 min exploitables).

- **Revue des connaissances relative aux effets sanitaires des infrasons et bruits basses fréquences émis par les parcs éoliens**

Une recherche bibliographique[4] systématique par mots clés a été réalisée sur la période allant jusqu'au 1er décembre 2015, le corpus documentaire ayant été régulièrement mis à jour pendant l'expertise.

En complément de cette recherche, d'autres documents ont été recensés *via* les références bibliographiques de rapports et documents clés préalablement identifiés.

Enfin, le corpus bibliographique a été complété *via* des auditions[5], au cours desquelles les différentes parties-prenantes invitées ont porté à la connaissance du groupe de travail les références bibliographiques qu'elles considéraient pertinentes sur ce sujet.

Ces différents documents ont été triés, analysés, puis ont fait l'objet d'une synthèse.

Compte-tenu des controverses associées à la description de « pathologies environnementales » telles que la *vibroacoustic disease* (VAD) et le syndrome éolien (*wind turbine syndrome*), les analyses d'articles s'y rapportant ont été regroupées dans une synthèse spécifique.

Par ailleurs, les analyses d'articles ont été regroupées par type d'études :

- les données expérimentales ;
- les données épidémiologiques.

- **Évaluation des risques pour la santé liés à l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores émis par les parcs éoliens**

L'élaboration des conclusions de l'expertise repose ainsi sur le croisement entre les données d'exposition aux infrasons et basses fréquences mesurés près des parcs éoliens et les niveaux de preuve apportés par la revue des connaissances sur les effets sanitaires potentiels liés à une exposition aux infrasons et basses fréquences sonores.

[4] Moteurs de recherche utilisés : PubMed, Science Direct et Google Scholar.

[5] Notamment le Syndicat des énergies renouvelables (SER), Électricité de France (EdF) / Électricité de France – Énergies Nouvelles, France Énergie Éolienne (FEE), Vent de Colère, la Fédération Environnement Durable (FED) et plusieurs riverains d'éoliennes.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets de la présente synthèse, lors de sa séance du 5 décembre 2016 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

■ Exposition des riverains aux infrasons et basses fréquences émises par les éoliennes

La mesure de l'exposition aux infrasons et basses fréquences des riverains des parcs éoliens comporte de multiples complexités :

- de nature métrologique : l'étalonnage des instruments de mesure se révèle complexe et insatisfaisant pour les très basses fréquences, le bruit de fond instrumental étant plus élevé aux basses fréquences ;
- de nature organisationnelle : l'absence de norme technique publiée à l'heure actuelle limite la pertinence des comparaisons entre les mesures effectuées par différentes équipes, et ne garantit pas la qualité des pratiques. Par exemple, le choix de l'appareillage utilisé et des bandes de fréquences étudiées conditionne fortement les résultats. Un projet de norme concernant la mesure des infrasons pour toutes les sources sonores est cependant actuellement en cours de publication par l'Afnor ;
- en lien avec les spécificités de la source sonore et de son environnement : le signal sonore fluctue avec le temps suivant différents facteurs dont certains sont bien identifiés (vitesse de vent, topographie, etc.) et d'autres restent indéterminés ou peu contrôlables (turbulence du vent au niveau des pales ou dans le milieu de propagation, gradients de température locaux, etc.) ;

À l'intérieur des habitations s'ajoutent les difficultés à mesurer des signaux de faible puissance et des problèmes de réverbération des ondes sonores.

Ces difficultés métrologiques ont été prises en compte dans la réalisation de la campagne de mesures à proximité de trois parcs éoliens. Ces travaux, complétés par les données issues de la littérature, ont permis d'établir les constats suivants :

- les éoliennes sont des sources de bruit dont la part des infrasons et basses fréquences sonores prédominent dans le spectre d'émission sonore. D'après la littérature scientifique, le niveau sonore de ces composantes spectrales augmente avec la taille du rotor de l'éolienne ;
- les résultats de mesure de l'émission sonore des éoliennes confirment les tendances décrites dans la littérature scientifique :
    - le profil général du spectre d'émission du bruit éolien (décroissance quasi linéaire du niveau sonore avec le logarithme de la fréquence) est retrouvé sur tous les sites, avec peu de différences notables. Quelques raies fréquentielles, probablement attribuables au bruit mécanique dans la nacelle, ont été mises en évidence dans la partie infrasons et basses fréquences du spectre ;
    - plus la vitesse du vent augmente, plus l'émission sonore dans les infrasons et basses fréquences augmente, jusqu'à un maximum théorique ;

- les résultats des mesures de niveaux sonores à 500 m et 900 m (en façade des habitations) des parcs éoliens confirment les tendances observées dans la littérature scientifique pour 2 sites sur les 3 explorés[6] :
    - une forte dispersion des mesures en fonction du temps pour un parc éolien et un régime de vent donné. D'autres facteurs difficilement contrôlables (turbulence ponctuelle du vent, contamination par d'autres sources sonores, etc.) peuvent avoir une influence non négligeable sur le bruit mesuré ;
    - aucun dépassement des seuils d'audibilité dans les domaines des infrasons et basses fréquences n'a été constaté (< 50 Hz) ;
- les signaux infrasons et basses fréquences mesurés à l'intérieur des habitations, dans des conditions où les éoliennes fonctionnaient avec les vitesses de vent les plus élevées (supérieures à 6 m/s) rencontrées au cours des mesures, sont inférieurs au seuil d'audibilité (ISO 226[7]).

Le CES rappelle que les mesures des niveaux de bruit exprimés en dBA, qui sont celles préconisées par les normes techniques, ne sont pas adaptées aux infrasons et basses fréquences sonores. Cependant, le profil particulier du spectre sonore éolien implique une proportionnalité entre le contenu spectral mesuré en dBA et le contenu spectral de la partie infrasons et basses fréquences sonores. Ainsi, des informations pertinentes concernant l'exposition aux infrasons et basses fréquences peuvent être obtenues à partir de données d'exposition mesurées en dBA. Cette constatation rejoint celles dressées par des études récentes.

Ainsi, compte tenu des spectres d'émission des éoliennes actuelles, la limitation d'un niveau sonore en dBA entraîne également une limitation du niveau sonore des infrasons et basses fréquences.

■ Effets des infrasons et basses fréquences sonores sur la santé : exploitation des connaissances scientifiques disponibles

Un déséquilibre entre sources primaires et secondaires

Un examen des données disponibles concernant les effets sanitaires des infrasons permet de constater un fort déséquilibre entre les sources bibliographiques primaires (documents relatifs à des expériences ou études scientifiques originales) et secondaires (revues de la littérature scientifique ou articles d'opinion). En effet, les sources secondaires sont nombreuses alors que le nombre de sources primaires qu'elles sont censées synthétiser est limité. Cette particularité, ajoutée à la divergence très marquée des conclusions de ces revues, montre clairement l'existence d'une forte controverse publique sur cette thématique.

Revue des préoccupations sanitaires exprimées par des riverains de parcs éoliens

Les symptômes décrits par certains riverains de parcs éoliens, qu'ils associent à leur exposition aux émissions sonores des éoliennes, sont extrêmement divers. Ils ont été regroupés dans la littérature en deux catégories :

- ceux associés à la vibroacoustic disease (VAD) ;
- ceux constituant le « syndrome éolien » (wind turbine syndrome - WTS).

[6] La contribution sonore des éoliennes par rapport aux autres bruits enregistrés au niveau du riverain du site n° 2 n'a pas pu être établie de façon claire, ce qui a conduit à écarter ce site des analyses.
[7] ISO 226:2003 : Acoustique - Lignes isosoniques normales.

La VAD a été définie par une unique équipe de recherche[8] et désigne un mécanisme biologique particulier qu'elle relie à l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores (croissance dans les matrices extracellulaires de fibres de type collagène et élastine, en l'absence de tout processus inflammatoire). Ce mécanisme pourrait, selon ces auteurs, conduire à terme à l'apparition d'une large diversité d'effets sanitaires (fibroses, atteintes du système immunitaire, effets respiratoires, effets génotoxiques, modifications morphologiques d'organes, etc.).

Le groupe de travail a attribué un très faible niveau de preuve à cette hypothèse de mécanisme d'effets sanitaires, en raison de ses faibles bases scientifiques et des biais importants dans les études publiées par cette équipe dans des revues souvent non soumises à comité de lecture, et dont les résultats n'ont pas été reproduits par d'autres équipes de recherche. Aussi, le groupe de travail n'a pas retenu la VAD dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires potentiels liés aux émissions sonores des éoliennes.

Le syndrome éolien (WTS) a été décrit dans la littérature (Pierpont 2009) comme un ensemble de symptômes rapportés par des riverains de parcs éoliens et dont ils attribuent eux-mêmes la cause aux éoliennes. Ces symptômes (troubles du sommeil, maux de tête, acouphènes, troubles de l'équilibre, etc.) ne sont pas spécifiques d'une pathologie. Ils sont notamment retrouvés dans les syndromes d'intolérance environnementale idiopathique. Ils correspondent cependant à un ensemble de manifestations pouvant être consécutives à un stress, à la perte de sommeil, qui peuvent devenir handicapantes pour le sujet qui les ressent.

Bilan des données expérimentales

- ✓ **Des pistes de mécanismes d'effets via le système cochléo-vestibulaire, qui restent à confirmer**

Les connaissances relatives à la physiologie du système cochléo-vestibulaire récemment acquises ont révélé plusieurs pistes de mécanismes d'effets physiologiques qui pourraient être activés en réponse à une exposition à des infrasons et basses fréquences sonores. Ce système sensoriel dispose en effet d'une sensibilité particulière à ces fréquences, supérieure à celle d'autres parties du corps humain.

Les données actuelles permettent d'évoquer l'hypothèse que des sons de fréquences trop basses ou de niveaux trop faibles pour être clairement audibles pourraient avoir des effets médiés par des récepteurs du système cochléo-vestibulaire. Parmi les mécanismes possibles, on peut citer :

- l'induction de réponses non auditives par les cellules vestibulaires lorsqu'un son de fréquence très basse parvient à la base de la cochlée ;
- une stimulation « non classique » des cellules sensorielles auditives les plus apicales activant des voies cochléaires non auditives ;
- l'induction de déséquilibres ioniques et volumiques dans les liquides de l'oreille interne, par la mise en vibration globale et prolongée de la membrane basilaire par un son de fréquence très basse ;
- l'induction de modulations de la réponse des cellules sensorielles auditives à des sons ordinaires par des sons très basse fréquence, inaudibles par eux-mêmes mais affectant l'audition des sons audibles concomitants. Certaines particularités, notamment anatomiques, pourraient prédisposer leurs porteurs à des modulations de plus grande intensité ;
- dans l'hypothèse que le dépassement de certains niveaux sonores serait susceptible de générer une stimulation nerveuse au niveau de l'appareil cochléo-vestibulaire (Salt et

[8] Équipe de recherche d'Alves-Pereira et Castelo-Branco.

Hullar 2010), les niveaux sonores ponctuellement[9] rencontrés dans le cadre des mesures réalisées ont montré que ces niveaux pouvaient être dépassés à l'extérieur des habitations, pour des fréquences inférieures à 20 Hz.

Les phénomènes cités ci-dessus ont été observés expérimentalement à l'aide de sons purs intenses (par exemple une centaine de dB SPL à 200 Hz chez le petit animal de laboratoire, ce qui n'équivaut pas forcément à un son de très basse fréquence chez l'Homme) ; leur existence pour des expositions sonores se rapprochant de celles dues aux éoliennes (sons complexes, de moindre intensité sonore mais de durée prolongée) reste à démontrer.

Le groupe de travail souligne que ces effets physiologiques, souvent évoqués par les associations de riverains de parcs éoliens, ont une signature objective ; par exemple, s'il y a déséquilibre volumique des liquides de l'oreille interne, cela se traduit par des résultats anormaux à des tests ORL, avec une sensibilité et une spécificité élevées. Or, cette signature n'a pour l'instant jamais été recherchée chez les plaignants.

Ces effets physiologiques se traduisent par ailleurs par des manifestations (vertiges, acouphènes, nausées, etc.) que les personnes savent décrire mais qui sont rarement mentionnées, les divers témoignages recueillis au cours de cette expertise décrivent cependant plus fréquemment d'autres types d'effets, tels que des troubles du sommeil et de l'humeur (dépression, stress, anxiété, etc.).

- ✓ **Des effets mal cernés pour les expositions à des infrasons et basses fréquences sonores de très fortes intensités**

Les expositions à des infrasons et basses fréquences sonores de très fortes intensités (de 20 à 40 dB plus élevées que celles des éoliennes, donc mettant en jeu des énergies 100 à 10 000 fois supérieures) sont retrouvées dans le milieu professionnel. Cependant, leurs effets font l'objet de controverses (effets peu spécifiques, données mal étayées et/ou anciennes, etc.). La problématique scientifique n'est donc pas élucidée, et les recommandations en matière de limitation des expositions professionnelles publiées ne sont aucunement transposables à la présente saisine.

- ✓ **Des connaissances peu stabilisées quant aux effets des expositions prolongées aux infrasons et basses fréquences de plus faibles niveaux sonores**

Il existe très peu de publications soumises à comité de lecture évoquant la problématique des effets potentiels des infrasons et basses fréquences produits par les éoliennes. Cependant, quelques études ont été réalisées pour d'autres sources de bruit, telles que des bruits de ventilation, de pompes à chaleur ou de compresseurs, des bruits de trafic routier, etc., pour des intensités de mêmes niveaux que celles émises par les parcs éoliens. Dans ces études, la gêne auto déclarée (questionnaire) constitue le seul effet sanitaire observé. Aucune association n'a été retrouvée avec un marqueur physiologique pouvant identifier un effet sur la santé. Ces études ont néanmoins permis d'établir qu'il faut un niveau sonore beaucoup plus élevé, par rapport à ce qui est connu pour les fréquences plus hautes, pour percevoir un infrason et/ou entendre un son basse fréquence. L'extrapolation des résultats ci-dessus au cas des éoliennes doit être effectuée avec prudence.

[9] De quelques % du temps à 8 Hz, à 20 % du temps pour 20 Hz à une distance de 500 m de l'éolienne. Aucune fréquence en dessous de 8 Hz ne dépasse les différents seuils.

✓ **Un effet *nocebo* constaté**

Parallèlement à ces résultats controversés concernant les effets des expositions prolongées aux infrasons et basses fréquences sonores de faibles niveaux, plusieurs études expérimentales, de très bonne qualité scientifique, effectuées en double aveugle et répétées, démontrent l'existence d'effets et de ressentis négatifs chez des personnes pensant être exposées à des infrasons inaudibles alors qu'elles ne le sont pas forcément. Ces effets ou ressentis négatifs seraient causés par les seules attentes d'effets délétères associés à ces expositions.

Cet effet, que l'on peut qualifier de « *nocebo*[10] », contribue à expliquer l'existence de symptômes liés au stress chez des riverains de parcs éoliens. Il doit être d'autant plus important dans un contexte éolien où de multiples arguments d'opposition non exclusivement sanitaires (économiques, culturels, territoriaux, politiques, etc.) circulent, véhiculés en particulier par internet et qui peuvent contribuer à la création d'une situation anxiogène.

Néanmoins, l'existence d'un tel effet *nocebo* n'exclut pas de facto l'existence d'effets sanitaires qu'il peut potentiellement exacerber.

Bilan des données épidémiologiques

✓ **Des études peu nombreuses et peu concluantes**

Des travaux épidémiologiques devraient permettre de confronter les pistes de mécanismes d'effets physiologiques aux états de santé observés dans les populations riveraines. Malheureusement, ces études sont peu nombreuses et elles se sont exclusivement intéressées aux effets du bruit audible des éoliennes sur la santé des riverains. Il n'en existe aucune qui se soit focalisée sur les effets sur la santé des infrasons ou des sons basse fréquence émis dans l'environnement et plus particulièrement produits par les éoliennes.

Toutes sont des études transversales, et ne permettent donc pas d'affirmer que la cause, c'est-à-dire l'exposition au bruit des éoliennes, a bien précédé l'effet. Les résultats observés dans la majorité de ces études restent marqués par des biais de sélection ou de confusion. Une seule des études analysées peut être considérée comme étant de bonne qualité scientifique. C'est aussi la seule à avoir inclus non seulement des mesures subjectives mais aussi des mesures objectives associées aux effets potentiels auxquels elle s'intéresse. Cette étude ne montre pas d'association entre le niveau de bruit audible dû aux éoliennes et les états de santé auto-déclarés par les répondants (qualité de sommeil, vertiges, acouphènes, migraines et maux de tête fréquents, maladies chroniques comme les cardiopathies, l'hypertension et le diabète), le niveau de stress et la qualité de vie perçue. Les mesures objectives des états de santé (concentration de cortisol dans les cheveux, pression artérielle, fréquence cardiaque au repos et qualité de sommeil mesurée) sont cohérentes avec les déclarations des participants. De même, ces mesures ne sont pas associées avec le niveau de bruit audible dû aux éoliennes. En revanche, cette étude montre une association entre ce même niveau de bruit audible et la gêne due à certaines caractéristiques des éoliennes (effet stroboscopique, lumières clignotantes, vibrations, effet visuel).

Le faible nombre d'études réalisées sur cette question et leurs défauts méthodologiques sont autant d'éléments incitant à considérer qu'il n'est actuellement pas possible de conclure quant à l'impact du bruit des éoliennes sur la santé.

[10] L'effet *nocebo* peut être défini comme l'ensemble des symptômes ressentis par un sujet soumis à une intervention « vécue comme négative » qui peut être un médicament, une thérapeutique non médicamenteuse ou une exposition à des facteurs environnementaux. Cet effet est l'opposé de l'effet *placebo*, défini initialement en médecine comme « *Substance améliorant les symptômes présentés par un malade alors que son efficacité pharmacologiquement prévisible devrait être nulle ou négligeable* ». L'effet du vecteur varie dans les deux cas selon l'attente du sujet.

Conclusions

Certains riverains d'éoliennes affirment ressentir des effets sanitaires qu'ils attribuent aux infrasons émis. Parmi ces riverains, des situations de réels mal-être sont rencontrées, et des effets sur la santé parfois constatés médicalement, mais pour lesquels la causalité avec l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores produits par les éoliennes ne peut pas être établie de manière évidente.

L'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes ne constitue qu'une hypothèse d'explication de ces effets, parmi les nombreuses rapportées (bruit audible, visuels, stroboscopiques, champ électromagnétique, etc.). Cette situation n'est pas spécifique aux éoliennes. Elle peut être rapprochée de celles rencontrées dans d'autres domaines, comme celui des ondes électromagnétiques.

Il est très difficile d'isoler, à l'heure actuelle, les effets sur la santé des infrasons et basses fréquences sonores de ceux du bruit audible ou d'autres causes potentielles qui pourraient être dues aux éoliennes.

La campagne de mesure réalisée par l'Anses :

- confirme que les éoliennes sont des sources de bruit dont la part des infrasons et basses fréquences sonores prédomine dans le spectre d'émission sonore ;
- ne montre aucun dépassement des seuils d'audibilité dans les domaines des infrasons et basses fréquences sonores (< 50 Hz).

Par ailleurs, d'après l'analyse de la littérature :

- les infrasons pourraient être ressentis par des mécanismes cochléo-vestibulaires différents de l'audition à plus hautes fréquences ;
- des effets physiologiques ont été mis en évidence chez l'animal (système cochléo-vestibulaire) pour des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores élevés ;
- ces effets restent à démontrer chez l'être humain pour des expositions de l'ordre de celles liées aux éoliennes chez les riverains (exposition longue à de faibles niveaux d'exposition) ;
- le lien entre des effets physiologiques potentiels et la survenue d'un effet sanitaire n'est pas documenté ;
- les symptômes attendus en cas de perturbation du système cochléo-vestibulaire ne sont généralement pas ceux rapportés par les plaignants ; ils semblent plutôt liés au stress et sont retrouvés dans le syndrome éolien (WTS) ;
- un effet nocebo est constaté mais bien entendu n'exclut pas l'existence d'autres effets ;
- en raison de ses faibles bases scientifiques, la « vibroacoustic disease » (VAD) ne permet pas d'expliquer les symptômes rapportés ;
- aucune étude épidémiologique ne s'est intéressée à ce jour aux effets sur la santé des infrasons et basses fréquences sonores produits spécifiquement par les éoliennes. À l'heure actuelle, le seul effet observé par les études épidémiologiques est la gêne due au bruit audible des éoliennes.

Recommandations de l'expertise collective

Amélioration du processus d'information des riverains lors de l'implantation des parcs éoliens

En règle générale, l'état de santé de la population dépend en partie de son degré d'information et de participation dans la mise en place d'un projet d'aménagement dans son environnement proche.

Lors de l'implantation d'un parc éolien à proximité d'habitations, le CES recommande :

- de veiller à transmettre des éléments d'information pertinents relatifs aux projets de parcs éoliens au plus tôt (avant enquête publique) aux riverains concernés. La rédaction d'un guide explicitant les informations à transmettre a minima en amont de l'enquête publique serait souhaitable ;
- d'améliorer la visibilité des enquêtes publiques ;
- d'étendre le périmètre d'information et de consultation à l'ensemble des riverains potentiellement impactés par le projet (en considération des impacts visuels, sonores, etc.) sans le limiter, comme actuellement, aux seules communes porteuses des projets ;
- de palier l'accès aux très nombreuses informations contradictoires, anxiogènes ou non, disponibles sur internet, en mettant à disposition du grand public un état des connaissances régulièrement actualisé (site internet dédié par exemple) et en indiquant son existence aux riverains potentiellement concernés, en amont de la discussion d'un projet de parc éolien.

Concernant le nécessaire dialogue entre parties prenantes autour de parcs ou de projets de parcs éoliens, le CES recommande :

- de favoriser les concertations en amont des projets de parcs éoliens. En effet, les porteurs de projet demandent d'abord à l'administration le permis de construire en déposant une étude d'impact sur un projet finalisé, et l'enquête publique arrive en fin de processus, minimisant ainsi le poids de cette enquête dans le processus de décision ;
- de mieux définir les interlocuteurs au niveau local et de mieux les impliquer dans le dialogue.

Renforcement des connaissances relatives aux expositions des riverains

Afin de faire progresser les connaissances sur les expositions aux infrasons et basses fréquences sonores, et compte-tenu de la complexité de leur mesure, le CES encourage :

- le recours à des méthodes normalisées de mesure des infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes. Les types d'appareils utilisés, le protocole ou la méthodologie à suivre pour réaliser des mesures reproductibles et comparables devront être spécifiés. Le CES souligne que, compte-tenu de la forte corrélation entre le niveau sonore exprimé en dBA et le niveau des infrasons et basses fréquences sonores pour les éoliennes, il pourrait également être intéressant d'utiliser des méthodes d'estimation des infrasons et basses fréquences sonores à partir de mesures en dBA ;
- la conception d'un modèle de prévision des expositions aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes.

Afin d'améliorer la comparabilité entre elles des données d'exposition aux bruits produits par les éoliennes, le CES recommande :

- de développer une méthode expérimentale de caractérisation de la modulation d'amplitude ;
- de déterminer, comme c'est le cas pour le bruit des transports[11], une méthode de calcul unique de prévision du bruit d'éolienne. Elle devra tenir compte des différents paramètres d'influence, à utiliser pour la réalisation de l'étude d'impact sonore dans le cadre de la demande d'autorisation ICPE.

Réglementation

Contrôle systématique des émissions sonores des parcs éoliens

Le CES recommande que la puissance sonore des éoliennes soit systématiquement contrôlée *in situ*, avant leur mise en service afin de s'assurer que les caractéristiques sonores des éoliennes installées sont conformes à celles spécifiées dans l'étude d'impact.

À l'exemple des pratiques dans le domaine aéroportuaire, le CES suggère également, dès la mise en service du parc, la mise en place d'un contrôle systématique et continu des niveaux sonores (audibles et dans la gamme des infrasons et basses fréquences) dus au parc, en un ou plusieurs points représentatifs, à la charge de l'exploitant. Une méthode de contrôle simplifiée devra être proposée afin :

- de suivre l'évolution des niveaux sonores par rapport aux valeurs limites réglementaires et, le cas échéant, d'identifier les éventuelles périodes pour lesquelles les valeurs limites réglementaires seraient dépassées et de déterminer leur fréquence de dépassement ;
- de disposer de mesures de bruit à confronter aux journaux de gêne tenus par les riverains et de rechercher les possibles correspondances entre bruit et gêne déclarée.

En cas de dépassements répétés et significatifs des valeurs limites réglementaires, le CES recommande de définir des critères précis conduisant à des actions restant à déterminer (amendes, arrêt forcé, mise en conformité, etc.).

Le CES préconise également la réalisation d'une campagne de mesure de l'impact sonore éolien à l'aide d'une méthode d'expertise telle que définie par la norme Pr S 31-114[12] en cours de rédaction. Le groupe de travail insiste sur l'importance de réaliser des mesures en limite de propriété.

Le CES souligne que ce type de pratiques a contribué à une atténuation des tensions existantes autour des plateformes aéroportuaires, car elle permet d'objectiver les expositions et de mieux répondre aux demandes des riverains.

La nomination d'un interlocuteur privilégié, chargé du suivi de ce contrôle systématique des expositions et de la réponse aux sollicitations des riverains devrait être envisagée.

Valeurs limites

Actuellement, la réglementation requiert notamment une valeur limite d'exposition au bruit en limite de propriété (70 dBA en journée, 60 dBA la nuit) a priori peu adaptée aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes, puisqu'exprimée en dBA.

Cependant, à la distance minimale d'éloignement des éoliennes par rapport aux habitations (500 m actuellement) et considérant le profil particulier des spectres des éoliennes actuellement en fonctionnement, qui permet d'établir une relation entre niveaux en dBA et dBG pour ces sources

[11] NF S 31-133 : Acoustique – Bruit dans l'environnement – Calculs de niveaux sonores.
[12] Pr S 31-114 : Mesurage du bruit dans l'environnement avant et après installation éolienne.

sonores, le CES considère que les valeurs limites exprimées en dBA peuvent déjà garantir des expositions des riverains (en façade des habitations) aux infrasons et basses fréquences sonores inférieures au seuil d'audibilité communément admis (85 dBG).

Le respect de ces valeurs limites doit donc permettre de prémunir les riverains de toute nuisance potentielle liée à l'audibilité des composantes basses et très basses fréquences du bruit éolien. En revanche, ces valeurs limites ne permettent pas de protéger les riverains d'éventuels effets associés à des infrasons et basses fréquences sonores non audibles, dont l'existence reste cependant encore à démontrer.

Pour réduire les expositions sonores des riverains des parcs éoliens les plus anciens et compte-tenu des performances acoustiques des turbines les plus récentes, le CES recommande de faciliter le remplacement d'anciennes éoliennes par de nouvelles en simplifiant le processus administratif associé.

- **Amélioration des connaissances concernant les relations entre santé et exposition aux infrasons et basses fréquences sonores**

Études expérimentales

Considérant les pistes de mécanismes cochléo-vestibulaires à l'origine d'effets constatés chez l'animal en laboratoire et l'avancée récente des techniques de mesures physiologiques non invasives qui peuvent être effectuées en quelques dizaines de minutes, le CES recommande la réalisation d'études complémentaires chez l'être humain, à domicile, en utilisant ces techniques.

Les tests déjà validés pour la détection d'une homéostasie anormale des cellules sensorielles cochléaires chez des malades atteints de vertiges de Ménière pourraient donc être utilisés (otoémissions provoquées, otoémissions spontanées, électrocochléographie, vidéonystagmoscopie). Ces tests peuvent tous être pratiqués sur le terrain et répétés sans inconfort. Il est donc concevable de les réaliser chez des sujets, plaignants (individus décrivant des symptômes d'intérêt) ou non, exposés ou non à des sons très basses fréquences en provenance du champ d'éoliennes à proximité duquel ils résident.

La mise en place d'une étude où l'on retrouverait la signature objective d'un effet physiologique chez des plaignants mais pas chez des non-plaignants, et ce, uniquement lorsque le parc éolien serait en fonctionnement, pourrait fournir des éléments de réponse importants. Ces observations permettraient non seulement la concrétisation d'une piste explicative, mais aussi la possibilité d'identifier des personnes à risque, et celle de déterminer le seuil physique au-dessus duquel un risque spécifique émerge.

Études épidémiologiques

L'observation des états de santé des riverains d'éoliennes, grâce notamment à des études épidémiologiques, apparaît comme une piste évidente et complémentaire aux avancées des connaissances attendues sur les mécanismes physiologiques. Réclamée par les associations de riverains, la réalisation de telles études épidémiologiques rencontre néanmoins certaines difficultés d'ordre méthodologique, notamment un problème de puissance statistique en raison du nombre manifestement limité d'individus exposés au bruit audible et inaudible des éoliennes, mais également la survenue d'innombrables biais souvent non contrôlés. Compte-tenu de l'investissement conséquent pour réaliser de telles études, mais également de la possible pertinence des données qu'elles pourraient générer, le CES appuie la réalisation préalable d'une étude de faisabilité d'une telle étude épidémiologique.

Études psychoacoustiques

Considérant l'importance de l'effet des sons audibles sur la gêne occasionnée par les éoliennes, et compte tenu de lacunes actuelles dans ce domaine, le CES préconise :

- de réaliser des études complémentaires portant sur la sonie de sons complexes basses fréquences (pas uniquement des sons purs) ;
- de développer pour cela un protocole d'étude permettant de quantifier la variabilité interindividuelle de la perception par la réalisation de tests d'audibilité, etc.
- d'améliorer la caractérisation de la gêne liée aux variations temporelles de bruits audibles non stationnaires et aux modulations d'amplitude mais également aux autres facteurs (visuels, vibrations, etc.).

Études en neurosciences

Enfin, compte-tenu des impacts du stress sur la santé et de l'effet *nocebo* mis en évidence, le CES suggère de favoriser la recherche en neurosciences et notamment les études utilisant l'imagerie médicale afin d'identifier les mécanismes impliqués.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail reprend les conclusions et recommandations formulées ci-dessus par le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

L'Anses rappelle que les éoliennes émettent des infrasons (bruits inférieurs à 20 Hz) et des basses fréquences sonores. Il existe également d'autres sources d'émission d'infrasons qui sont d'origine naturelle (vent notamment) ou anthropique (poids-lourds, pompes à chaleur, etc.). Les campagnes de mesure réalisées au cours de l'expertise ont permis de caractériser ces émissions pour trois parcs éoliens.

De manière générale, les infrasons ne sont audibles ou perçus par l'être humain qu'à de très forts niveaux. À la distance minimale d'éloignement des habitations par rapport aux sites d'implantations des parcs éoliens (500 m) prévue par la réglementation, les infrasons produits par les éoliennes ne dépassent pas les seuils d'audibilité. Par conséquent, la gêne liée au bruit audible potentiellement ressentie par les personnes autour des parcs éoliens concerne essentiellement les fréquences supérieures à 50 Hz.

L'expertise met en évidence le fait que les mécanismes d'effets sur la santé regroupés sous le terme « *vibroacoustic disease* », rapportés dans certaines publications, ne reposent sur aucune base scientifique sérieuse.

Un faible nombre d'études scientifiques se sont intéressées aux effets potentiels sur la santé des infrasons et basses fréquences produits par les éoliennes. L'examen de ces données expérimentales et épidémiologiques ne mettent pas en évidence d'argument scientifique suffisant en faveur de l'existence d'effets sanitaires liés aux expositions au bruit des éoliennes, autres que la gêne liée au bruit audible et un effet nocebo, qui peut contribuer à expliquer l'existence de symptômes liés au stress ressentis par des riverains de parcs éolien.

Cependant, des connaissances acquises récemment sur la physiologie du système cochléo-vestibulaire ont révélé chez l'animal l'existence d'effets physiologiques induits par l'exposition à des infrasons de forts niveaux. Ces effets, bien que plausibles chez l'être humain, restent à démontrer pour des expositions à des niveaux comparables à ceux observés chez les riverains de

parcs éoliens. Par ailleurs, le lien entre ces effets physiologiques et la survenue d'un effet sanitaire n'est aujourd'hui pas documenté.

Dans ce contexte, l'Anses recommande :

En matière d'études et de recherches :

- de vérifier l'existence ou non d'un possible mécanisme de modulation de la perception du son audible par des infrasons de niveaux comparables à ceux mesurés chez les riverains ;
- d'étudier les effets de la modulation d'amplitude du signal acoustique sur la gêne ressentie liée au bruit ;
- d'étudier l'hypothèse de mécanismes d'effets cochléo-vestibulaires pouvant être à l'origine d'effets physiopathologiques ;
- de réaliser une étude parmi les riverains de parcs éoliens qui permettrait d'identifier une signature objective d'un effet physiologique.

En matière d'information des riverains et de surveillance des niveaux de bruit :

- de renforcer l'information des riverains dans la mise en place des projets d'installation de parcs éoliens et la participation aux enquêtes publiques conduite en milieu rural ;
- de systématiser les contrôles des émissions sonores des éoliennes pendant et après leur mise en service ;
- de mettre en place, notamment dans le cas de situations de controverses, des systèmes de mesurage en continu du bruit autour des parcs éoliens (en s'appuyant par exemple sur l'expérience acquise dans le milieu aéroportuaire).

Enfin, l'agence rappelle que la réglementation actuelle prévoit que la distance d'une éolienne à la première habitation est évaluée au cas par cas, en tenant compte des spécificités des parcs. Cette distance est au minimum de 500 m[13], elle peut être étendue, à l'issue de la réalisation d'une étude d'impact, afin de respecter les valeurs limites[14] d'exposition au bruit.

Les connaissances actuelles en matière d'effets potentiels sur la santé liés à l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores ne justifient ni de modifier les valeurs limites existantes, ni d'étendre le spectre sonore actuellement considéré.

Dr Roger GENET

[13] En ce qui concerne les distances minimales d'implantation, celles déjà imposées par la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 (article 90) sont conservées : 500 mètres de toute construction à usage d'habitation ou zone destinée à l'habitation, 300 mètres d'une installation nucléaire de base ou d'une ICPE.

[14] Les émissions sonores d'une installation classée soumise à autorisation ne doivent pas engendrer, dans les zones à émergence réglementée, une émergence supérieure aux valeurs admissibles.

MOTS-CLES

Parcs éoliens, éoliennes, basses fréquences sonores, infrasons, évaluation des risques.

Wind farm, wind turbines, low frequency noise, infrasound, risk assessment.

Évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens

Saisine « 2013-SA-0115 – éoliennes »

Rapport d'expertise collective

Comité d'experts spécialisé : « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

Groupe de travail : « Effets sur la santé des basses fréquences et infrasons dus aux parcs éoliens »

Décembre 2016

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de environnement et du travail,
14 rue Pierre et Marie Curie, 94701 Maisons-Alfort Cedex
Téléphone : + 33 (0)1 49 77 13 50 – Télécopie : + 33 (0)1 49 77 26 26 – www.anses.fr

Mots clés

Parcs éoliens, éoliennes, basses fréquences sonores, infrasons, évaluation des risques.

Wind farm, wind turbines, low frequency noise, infrasound, risk assessment

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae,* et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Philippe LEPOUTRE – Ingénieur acousticien, responsable du pôle technique bruit à l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (Acnusa) – *Acoustique et réglementation.*

Membres

M. Paul AVAN – Directeur de l'UMR Inserm 1107 - Équipe Biophysique Neurosensorielle, facultés de Médecine et de Pharmacie de Clermont-Ferrand – *Médecine et physiologie générale. (à partir du 27/11/2014).*

M. Alain de CHEVEIGNÉ – Directeur de recherche (CNRS / ENS / University College of London) – *Psychoacoustique et biostatistiques. (démission du GT le 04/09/2015).*

M. David ECOTIERE – Responsable d'équipe de recherche au centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) – *Métrologie acoustique.*

Mme Anne-Sophie EVRARD – Chargée de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) – *Épidémiologie.*

Mme Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre – *Médecine et physiologie générale.*

M. David MICHAUD – Professeur adjoint à l'Université d'Ottawa, Chercheur à Santé Canada – *Psychoacoustique, épidémiologie, acoustique.*

M. Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail – *Acoustique, évaluation des risques sanitaires.*

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant le 5 décembre 2016 :

- CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

Présidente

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Membres

Laurent BEUGNET – Médecin du travail, RATP.

Alexandre BOUNOUH – Chef de projet / Ingénieur de recherche au Laboratoire national d'essais (LNE).

Pierre CAMPO – Chercheur, Institut de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS).

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Anthony CADÈNE – Chef de projets scientifiques, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Olivier MERCKEL – Chef de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Aurélie NIAUDET – Adjointe au chef de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques

– Anses.

Contribution scientifique

M. Anthony CADÈNE – Chef de projets scientifiques – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

M. Guillaume DUTILLEUX – Chef du Groupe Acoustique du Cerema – Est / **Président de la commission de normalisation AFNOR S30 J « Bruit dans l'environnement »**, le 10 juillet 2014.

M. Paul Avan – Directeur de l'UMR Inserm 1107 - **Équipe Biophysique Neurosensorielle, facultés de Médecine et de Pharmacie de Clermont-Ferrand**, le 30 septembre 2014.

Riveraine du parc éolien du Val de Noye (80), le 23 octobre 2014.

M. Ha-Duong – Directeur de recherche, **Centre National de recherche scientifique (CNRS), Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED)**, le 16 novembre 2015.

Syndicat des énergies renouvelables (SER), le 10 décembre 2015.

Électricité de France (EdF) / Électricité de France – Énergies Nouvelles (EdF–EN), le 10 décembre 2015.

Riveraine du parc éolien des Barthes (43), le 10 décembre 2015.

France Énergie Éolienne (FEE), le 11 février 2016.

Vent de Colère, Fédération Nationale, le 11 février 2016.

Fédération Environnement Durable (FED), le 8 mars 2016.

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

- Revue réglementaire mise à la disposition du groupe de travail : « État de l'art des réglementations relatives aux bruits de basse fréquence, s'appliquant aux éoliennes en particulier » réalisée par le Centre d'information et de documentation sur le bruit (CIDB).

- Synthèse des éléments de contexte de nature socioéconomique sur le sujet des éoliennes mise à la disposition du groupe de travail : « Analyse du contexte socio-économique entourant l'implantation des parcs éoliens en France » ; réalisée par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired – Unité mixte d erecherche 8568) sous la tutelle du Centre nationale de recherche scientifique (CNRS).

SOMMAIRE

Présentation des intervenants 3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions 12
Sigles et abréviations 26
Glossaire 28
Liste des tableaux 29
Liste des figures 30

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine 36

1.1 Contexte 36
1.2 Objet de la saisine 36
1.3 Champ de l'expertise 37
1.3.1 Sources de bruit et gammes de fréquences 37
1.3.2 Effets sanitaires 37
1.3.3 Population 37
1.4 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation 37
1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts. 38

2 Éléments de contexte 39

2.1 Généralités sur l'acoustique 39
2.1.1 Définitions du bruit 39
2.1.2 Niveaux de pression acoustique et unités 40
2.1.3 Sons basses fréquences, infrasons, vibrations 40
2.1.4 Usage d'une pondération fréquentielle 41
2.2 Éoliennes et bruits basses fréquences et infrasons 43
2.2.1 Description et fonctionnement d'une éolienne 43
2.2.2 Émissions sonores des éoliennes 43
2.2.3 Mesures de bruit éolien et difficultés métrologiques 44
2.3 Description et perspectives du parc éolien français 48
2.3.1 La place de l'électricité éolienne dans le secteur énergétique français 48
2.3.2 La place du parc éolien français dans le monde 49
2.3.3 Un parc éolien très hétérogène 51
2.3.4 Perspectives de l'éolien en France 54
2.4 Contexte socioéconomique autour de l'implantation des parcs éoliens en France 56
2.4.1 Contexte et enjeux du développement de l'énergie éolienne en France 57
2.4.2 Appuis économiques et administratifs au développement de l'éolien en France 59
2.4.3 Panorama des différentes instances de décision et de discussion de la politique éolienne et de leurs acteurs 60
2.4.4 Analyses des problématiques liées aux projets de parcs éoliens 61
2.4.4.1 Description des dynamiques associatives locales autour des éoliennes 61
2.4.4.2 Controverses et problématiques soulevées par l'implantation de parcs éoliens 64

2.4.4.3 Principaux facteurs d'opposition ou d'adhésion aux projets (freins et leviers) ... 66
2.5 Infrasons et basses fréquences (IBF) : préoccupations pour la santé ... 68
2.5.1 Syndrome éolien ou « *Wind turbine syndrome* » (WTS) ... 68
2.5.2 « Maladie vibroacoustique » ou « *Vibroacoustic disease* » (VAD) ... 69
2.5.3 Effets cochléovestibulaires ... 69
2.5.4 Autres effets ... 69
2.5.5 Position des acteurs industriels ... 70
2.5.6 Position des riverains et des associations de riverains ... 70

3 État des lieux de la réglementation et de la normalisation ... 71

3.1 Réglementation française ... 71
3.1.1 Réglementation spécifique aux parcs éoliens ... 71
3.1.1.1 Valeurs limites ... 73
3.1.1.2 Distances minimum d'éloignement ... 74
3.1.2 Spécificités réglementaires pour les bruits basses fréquences, infrasons, vibrations et bruits solidiens émis dans l'environnement ... 74
3.1.2.1 Circulaire de 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement ... 74
3.1.2.2 Infrasons ... 75
3.2 Principales réglementations étrangères spécifiques aux éoliennes ... 75
3.2.1 Allemagne ... 75
3.2.2 Danemark ... 77
3.2.3 Finlande ... 79
3.2.4 Grande-Bretagne ... 80
3.2.5 Pays-Bas ... 81
3.2.6 Pologne ... 83
3.2.7 Suède ... 83
3.2.8 Suisse ... 84
3.2.9 Australie ... 86
3.2.9.1 Australie du sud ... 86
3.2.9.2 Nouvelles Galles du sud ... 87
3.2.10 Canada ... 88
3.2.10.1 Alberta ... 88
3.2.10.2 Ontario ... 89
3.2.11 États- Unis d'Amérique ... 89
3.2.12 Nouvelle Zélande ... 92
3.2.13 Japon ... 92
3.2.14 Recommandations de l'OMS ... 93
3.3 Autres réglementations étrangères d'intérêt s'appliquant aux basses fréquences et infrasons d'autres sources ... 94
3.3.1 Bruit et vibrations dues au transport ferroviaire (Danemark) ... 94
3.3.2 *Ferrys* à grande vitesse (Danemark) ... 95
3.3.3 Protection des travailleurs ... 95
3.3.4 Confort sonore à l'intérieur des bâtiments (Suède) ... 95
3.3.5 Vibrations dans les bâtiments (Suède) ... 96
3.3.6 Bruits ferroviaires rayonnés par les structures (bruits solidiens, Suède) ... 97
3.3.7 Bruit solidiens dus aux infrastructures ferroviaires (Suisse) ... 97
3.4 Analyse et synthèse des réglementations ... 98

4 Génération et propagation du bruit des éoliennes 100

4.1 Bruit des éoliennes : de la source de bruit à l'exposition des personnes 100

4.2 Sources de bruit 101

4.2.1 Sources de bruit d'une éolienne 101
4.2.1.1 Bruits d'origine mécanique 102
4.2.1.2 Bruits d'origine aérodynamique 103
4.2.1.3 Emission sonore d'une éolienne 107
4.2.1.4 Directivité de l'émission sonore d'une éolienne 108
4.2.2 Sources de bruit de l'environnement, niveaux sonores résiduels, masquage 109
4.2.2.1 Le bruit des activités humaines 109
4.2.2.2 Le bruit du vent 109
4.2.2.3 Le bruit de la végétation 110
4.2.2.4 Les bruits de la faune 111
4.2.2.5 Exemples numériques de sources de bruit basse fréquence dans l'environnement 111

4.3 Propagation du bruit des éoliennes 111

4.3.1 Niveaux de bruit et distance 112
4.3.1.1 Divergence géométrique 112
4.3.1.2 Absorption atmosphérique 113
4.3.1.3 Niveaux de bruit et conditions météorologiques 114
4.3.2 Niveaux de bruit et caractéristiques de terrain 117
4.3.2.1 Influence de la nature du sol ou « effet de sol » 117
4.3.2.2 Influence de la végétation 119
4.3.2.3 Influence de la topographie 120

4.4 Prévision des niveaux de bruit 122

4.4.1 Modèles de référence 122
4.4.2 Modèles d'ingenierie 123

4.5 Bruits solidiens générés par les vibrations des éoliennes 125

Synthèse du chapitre 4 : génération et propagation du bruit des éoliennes 128

5 Exposition aux basses fréquences et infrasons des éoliennes 130

5.1 Campagnes de mesures 130

5.1.1 Objectifs visés 130
5.1.2 Sélection des parcs éoliens et situations étudiées 131
5.1.2.1 Site 1 : parc « majorant » et typique des futures éoliennes (parc éolien de la Motelle) 132
5.1.2.2 Site 2 : parc « classique », faisant l'objet de plaintes (parc éolien du Val de Noye) 133
5.1.2.3 Site 3 : parc « classique » ne faisant pas l'objet de plaintes (parc éolien Énergie du Porcien) 134
5.1.2.4 Autres sites désignés par le texte de saisine 135
5.1.3 Protocoles de mesure 136
5.1.4 Traitement des données recueillies 139

5.2 Résultats de la campagne de mesure 140

5.2.1 Spectres et niveaux sonores à différentes distances 142
5.2.2 Spectres à l'intérieur des bâtiments 149
5.2.3 Comparaison à des seuils 150
5.2.4 Comparaison des niveaux en dBA et en dBG 152

5.3 Synthèse des campagnes expérimentales 154

Synthèse du chapitre 5 : exposition aux basses fréquences et infrasons des éoliennes 156

6 Impacts sanitaires des infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes 158

6.1 Méthode de travail 158

6.2 Travaux d'expertise et revues de littérature 160

6.2.1 Organismes publics – rapports institutionnels 160

6.2.2 Revues de la littérature soumises à un comité de lecture 163

6.2.3 Autres catégories de revues 167

6.3 Synthèse des connaissances relatives aux effets des infrasons et sons basses fréquences des éoliennes 169

6.3.1 Synthèse des données issues de l'épidémiologie 169

6.3.1.1 Effets du bruit audible sur la santé 169

6.3.1.2 Effets du bruit des éoliennes sur la santé 170

6.3.1.2.1 Description des études épidémiologiques portant sur des populations exposées aux bruits audibles des éoliennes 170

6.3.1.2.2 Résultats des études épidémiologiques 172

6.3.1.2.3 Lacunes méthodologiques des études épidémiologiques 177

6.3.1.3 Conclusion 178

6.3.2 Système cochléo-vestibulaire et infrasons ou sons basse fréquence 178

6.3.2.1 La perception des sons très basses fréquences : auditive ou extra-auditive? 180

6.3.2.2 Système cochléaire 181

6.3.2.2.1 Les cellules sensorielles et leur stimulation 181

6.3.2.2.2 Le codage des sons de fréquences moyennes et aiguës est modulable par un son très basses fréquences superposé. 183

6.3.2.2.3 Les effets perturbants des basses fréquences et infrasons sur l'homéostasie cochléaire 184

6.3.2.3 Le système vestibulaire et les sons très basse fréquence 185

6.3.2.4 Le vestibule, bref rappel anatomophysiologique 185

6.3.2.4.1 Sensibilité du vestibule aux fréquences acoustiques 186

6.3.2.4.2 Bénéfices des réponses vestibulaires aux fréquences acoustiques ? 186

6.3.2.5 Conclusions 187

6.3.2.6 Perspectives expérimentales chez les sujets exposés 188

6.3.3 État des connaissances des effets sanitaires liés aux infrasons et basses fréquences sonores de fortes intensités 188

6.3.4 Effets des infrasons - synthèse des données expérimentales et cliniques 189

6.3.4.1 Éoliennes et infrasons 190

6.3.4.2 Infrasons émis par des sources autres que les éoliennes 192

6.3.4.2.1 Marqueurs de stress oxydatif 192

6.3.4.2.2 Études de variations de taux de cortisol 193

6.3.4.2.3 Études portant sur des paramètres physiologiques cardiaques (pression, fréquence) pouvant être corrélés à des questionnaires de gêne 193

6.3.4.2.4 Enregistrements de polysomnogrammes (électroencéphalogramme + électrooculogramme + électromyogramme) 195

6.3.4.2.5 Conclusion 196

6.3.5 Effets des basses fréquences - synthèse des données cliniques et expérimentales 197

6.4 Revue des préoccupations sanitaires associées aux basses fréquences et infrasons liés aux éoliennes 198

6.4.1 Vibroacoustic disease (VAD) 198

6.4.2 Syndrôme éolien (WTS) 199

6.4.3 Effets nocebo 201

7 Conclusions et recommandations 204

7.1 Conclusions du groupe de travail 204

7.2 Recommandations du groupe de travail 211

8 Bibliographie 215

8.1 Publications 215
8.2 Normes 226
8.3 Législation et réglementation 226

ANNEXES 228

Annexe 1 : Lettre de saisine 229
Annexe 2 : Grille de lecture bibliographique 231
Annexe 3 : Liste des documents identifiés, non retenus pour l'évaluation des risques et non discutés dans le rapport 233
Annexe 4 : Descripteurs et indices acoustiques usuels 246
Annexe 5 : Psychoacoustique appliquée au bruit des éoliennes 252
Annexe 6 : Paramètres psychoacoustiques du bruit éolien 258
Annexe 7 : Informations complémentaires relatives aux campagnes de mesures 263
Annexe 8 : Analyse des articles se rapportant à la VAD 280

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

Présentation de la question posée

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (Anses) a été saisie le 4 juillet 2013 par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) afin d'évaluer les effets sur la santé des basses fréquences et des infrasons dus aux parcs éoliens. La demande exprimée portait en particulier sur les points suivants :

- conduire une revue des connaissances disponibles en matière d'effets sanitaires auditifs et extra-auditifs dus aux parcs éoliens, en particulier dans le domaine des basses fréquences et des infrasons ;
- étudier les réglementations mises en œuvre dans les pays, notamment européens, confrontés aux mêmes problématiques ;
- mesurer l'impact sonore de parcs éoliens, notamment de ceux où une gêne est rapportée par les riverains, en prenant en compte les contributions des basses fréquences et des infrasons ;
- proposer des pistes d'amélioration de la prise en compte des éventuels effets sur la santé dans la réglementation, ainsi que des préconisations permettant de mieux appréhender ces effets sanitaires dans les études d'impact des projets éoliens.

Contexte scientifique et réglementaire

Le développement des éoliennes comme source d'énergie électrique renouvelable a conduit à s'interroger sur leur potentialité à produire des sons basses fréquences (20 Hz à 200 Hz) et des infrasons (inférieurs à 20 Hz) et sur leurs éventuelles conséquences pour la santé.

En mars 2006, l'Académie nationale de médecine a considéré, dans un rapport concernant le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'être humain, que l'impact sonore des parcs éoliens était comparable à celui des aéroports, des infrastructures de transports ou des usines. Ce rapport recommandait une classification des parcs éoliens en « zone industrielle » et une distance minimale d'implantation de 1 500 mètres des habitations.

Saisie alors par la DGPR et la DGS pour étudier les impacts sanitaires du bruit engendré par les éoliennes, l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse) avait conclu, dans son rapport intitulé « Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes » et publié en mars 2008, que les émissions sonores des éoliennes n'avaient pas de conséquences sanitaires directes tant au niveau de l'appareil auditif que des effets liés à l'exposition aux basses fréquences et aux infrasons. Ce rapport considérait également que l'énoncé systématique d'une distance minimale d'éloignement de 1 500 mètres, sans prendre en compte l'environnement (notamment topographique) du parc éolien, ne semblait pas pertinent.

La réglementation française relative aux éoliennes a depuis été modifiée, avec l'introduction d'une distance minimale d'implantation des éoliennes de 500 mètres au-delà de toute habitation, puis le classement des parcs éoliens dans le régime des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE, arrêtés du 26 août 2011). Ces textes considèrent les bandes d'octave de 125 à 4 000 Hz. Les très basses fréquences et les infrasons, plus difficiles à mesurer, ne sont actuellement pas pris en compte.

Comme l'a mis en évidence un travail spécifique sur l'encadrement réglementaire relatif au bruit des éoliennes ou aux infrasons et basses fréquences provenant de toutes sources sonores réalisé,

à la demande de l'Anses, par le Centre d'information et de documentation sur le bruit (CIDB) il n'existe pas actuellement de réglementation harmonisée au sein de l'Union européenne. Seuls quelques référentiels nationaux incluent des dispositions spécifiques aux parcs éoliens.

La plupart des plaintes liées à des bruits basses fréquences correspondent à des situations d'exposition à l'intérieur des bâtiments. Certains pays[1] ont ainsi développé des recommandations relatives à l'exposition aux bruits basses fréquences et aux infrasons à l'intérieur des habitations, le plus souvent au voisinage des installations industrielles.

En France, des plaintes de riverains concernant le bruit des éoliennes ont été signalées à la DGPR par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

Organisation de l'expertise

L'Anses a confié l'instruction de cette saisine au groupe de travail « Effets sur la santé des basses fréquences et infrasons dus aux parcs éoliens » rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

Ce groupe de travail, constitué à la suite d'un appel public à candidatures, a réuni des experts, sélectionnés pour leurs compétences et leur indépendance, dans des domaines scientifiques et techniques complémentaires. Il s'est réuni 27 fois en réunions plénières (à l'Anses) entre avril 2013 et octobre 2016.

Plusieurs auditions de parties prenantes et personnalités scientifiques se sont tenues pendant ces réunions, afin de permettre au groupe de travail de disposer de toutes les informations utiles et nécessaires pour la conduite de l'expertise.

Enfin, deux travaux complémentaires ont été sollicités, dans le cadre de conventions de recherche et développement financées par l'Anses :

- la réalisation, par le CIDB, d'une revue de la réglementation en vigueur relative aux bruits de basses fréquences, s'appliquant aux éoliennes en France et à l'international ;
- l'analyse du contexte socio-économique entourant l'implantation des parcs éoliens par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement[2].

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport et la synthèse d'expertise collective produits tiennent compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

[1] Par exemple, le Danemark a intégré officiellement la prise en compte des basses fréquences dans sa réglementation sur l'impact sonore des parcs éoliens. Mais les valeurs d'isolement prises pour le calcul des niveaux d'exposition aux basses fréquences sonores à l'intérieur des habitations sont controversées.

[2] Unité mixte de recherche n° 8568 du Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Description de la méthode d'expertise

■ Campagnes de mesures d'exposition au bruit des éoliennes

Afin de compléter les données issues de la littérature scientifique sur l'exposition aux infrasons et basses fréquences dus aux parcs éoliens, l'Anses a fait réaliser des campagnes de mesures de bruit (incluant basses fréquences et infrasons) à proximité de plusieurs parcs éoliens. Ces mesurages acoustiques ont été réalisés par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema[3]).

La sélection des sites (parcs éoliens) ayant fait l'objet des campagnes de mesures a été effectuée au regard d'un compromis entre le nombre de sites à inclure dans l'étude et le niveau d'analyse souhaité pour chacun de ces sites.

Le protocole des campagnes de mesures a été construit de manière à disposer, pour chaque parc éolien étudié :

- de l'ensemble des classes de vent possibles (catégories de vitesses et de directions du vent) ;
- de l'accès à quatre points de mesure simultanés :
    - à la distance minimale d'éloignement réglementaire (500 m) ;
    - en façade et à l'intérieur d'une habitation (de préférence la plus proche possible d'une éolienne) ;
    - et à proximité de la source, afin de caractériser l'émission sonore des éoliennes.

Au terme d'une réflexion confrontant plusieurs critères d'intérêt listés par les experts du groupe de travail et les caractéristiques connues des parcs éoliens en France, trois sites ont été sélectionnés, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- site 1 : parc constitué des plus grandes (diamètre des pales) et puissantes éoliennes en fonction en France aux dates de cette période d'analyse. Ces aérogénérateurs sont théoriquement ceux émettant le plus d'infrasons et basses fréquences, du fait de leurs grandes dimensions, et constituent une préfiguration des futures éoliennes de plus de 3 MW (période de mesure : du 12/10/2015 au 19/10/2015 ; 1 000 échantillons de 10 min exploitables) ;
- site 2 : parc de configuration « classique » faisant l'objet de plaintes (période de mesure : du 30/06/2015 au 06/07/2015 ; 887 échantillons de 10 min exploitables) ;
- site 3 : parc de configuration « classique » ne faisant pas l'objet de plaintes (période de mesure : du 23/03/2015 au 27/03/2015 ; 541 échantillons de 10 min exploitables).

[3] Le Cerema est un établissement public, créé en 2014 pour apporter un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement. Il regroupe les huit ex-Centres d'études techniques de l'équipement (CETE), l'ex-Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Certu), l'ex-Centre d'études techniques, maritimes et fluviales (CETMEF), et l'ex-Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Setra).

■ Revue des connaissances relative aux effets sanitaires des infrasons et bruits basses fréquences émis par les parcs éoliens

Recherche bibliographique

Une recherche bibliographique[4] systématique par mots clés a été réalisée sur la période allant jusqu'au 1er décembre 2015, le corpus documentaire ayant été régulièrement mis à jour pendant l'expertise.

En complément de cette recherche, d'autres documents ont été recensés *via* les références bibliographiques de rapports et documents clés préalablement identifiés.

Enfin, le corpus bibliographique a été complété *via* des auditions[5], au cours desquelles les différentes parties-prenantes invitées ont porté à la connaissance du groupe de travail les références bibliographiques qu'elles considéraient pertinentes sur ce sujet.

Au terme de ces recherches, près de 600 documents ont été identifiés et classés suivant les critères suivants :

- la typologie du document (article scientifique, rapport, thèse, actes de congrès, poster, etc.) ;
- le sujet ou les effets abordés (exposition, gêne, sommeil, stress, effets cognitifs, etc.) ;
- le type de bruit impliqué (toutes fréquences sonores, infrasons, basses fréquences, etc.) ;
- la nature de la source de bruit étudié (éoliennes, transports, industrie, etc.).

Tri et analyse des documents identifiés

Un premier tri de ce corpus a été effectué afin d'analyser uniquement les documents sources (par opposition aux revues de littérature) s'intéressant aux effets sanitaires. Les revues de littérature ont néanmoins été succinctement analysées, elles sont évoquées dans un chapitre dédié permettant de présenter les différents courants scientifiques s'intéressant aux effets potentiels des infrasons et basses fréquences sur la santé.

L'ensemble des articles originaux a ensuite été analysé par le groupe de travail à l'aide d'une grille de lecture permettant de qualifier la pertinence du sujet traité (par rapport au sujet des infrasons et basses fréquences émis par les éoliennes) et la qualité des données (contrôle ou non des biais potentiels dans l'étude, par exemple).

Les effets sanitaires auxquels les publications font références sont les suivants :

- effets auditifs ;
- état de santé générale (qualité de vie, paramètres physiologiques, équilibre, *etc*.) ;
- gêne – stress – sommeil – effets cardiovasculaires ;
- effets cognitifs.

Synthèse des connaissances relatives aux effets sanitaires potentiels des basses fréquences et infrasons émis par les éoliennes

[4] Moteurs de recherche utilisés : PubMed, Science Direct et Google Scholar.

[5] Notamment le Syndicat des énergies renouvelables (SER), Électricité de France (EdF) / Électricité de France – Énergies Nouvelles, France Énergie Éolienne (FEE), Vent de Colère, la Fédération Environnement Durable (FED) et plusieurs riverains d'éoliennes.

Compte tenu des controverses associées à la description de « pathologies environnementales » telles que la *vibroacoustic disease* (VAD) et le syndrome éolien (*wind turbine syndrome*), les analyses d'articles s'y rapportant ont été regroupées dans une synthèse spécifique.

Par ailleurs, les analyses d'articles ont été regroupées par type d'études :

- les données expérimentales ;
- les données épidémiologiques.

■ Évaluation des risques pour la santé liés à l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores émis par les parcs éoliens

L'élaboration des conclusions de l'expertise repose ainsi sur le croisement entre les données d'exposition aux infrasons et basses fréquences mesurées près des parcs éoliens et les niveaux de preuve apportés par la revue des connaissances sur les effets sanitaires potentiels liés à une exposition aux infrasons et basses fréquences.

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets de la présente synthèse, lors de sa séance du 5 décembre 2016 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

■ Exposition des riverains aux infrasons et basses fréquences émises par les éoliennes

La mesure de l'exposition aux infrasons et basses fréquences des riverains des parcs éoliens comporte de multiples complexités :

- de nature métrologique : l'étalonnage des instruments de mesure se révèle complexe et insatisfaisant pour les très basses fréquences, le bruit de fond instrumental étant plus élevé aux basses fréquences ;
- de nature organisationnelle : l'absence de norme technique publiée à l'heure actuelle limite la pertinence des comparaisons entre les mesures effectuées par différentes équipes, et ne garantit pas la qualité des pratiques. Par exemple, le choix de l'appareillage utilisé et des bandes de fréquences étudiées conditionne fortement les résultats. Un projet de norme concernant la mesure des infrasons pour toutes les sources sonores est cependant actuellement en cours de publication par l'Afnor ;
- en lien avec les spécificités de la source sonore et de son environnement : le signal sonore fluctue avec le temps suivant différents facteurs dont certains sont bien identifiés (vitesse de vent, topographie, etc.) et d'autres restent indéterminés ou peu contrôlables (turbulence du vent au niveau des pales ou dans le milieu de propagation, gradients de température locaux, etc.) ;

À l'intérieur des habitations s'ajoutent les difficultés à mesurer des signaux de faible puissance et des problèmes de réverbération des ondes sonores.

Ces difficultés métrologiques ont été prises en compte dans la réalisation de la campagne de mesures à proximité de trois parcs éoliens. Ces travaux, complétés par les données issues de la littérature, ont permis d'établir les constats suivants :

- les éoliennes sont des sources de bruit dont la part des infrasons et basses fréquences sonores prédominent dans le spectre d'émission sonore. D'après la littérature scientifique, le niveau sonore de ces composantes spectrales augmente avec la taille du rotor de l'éolienne ;

- les résultats de mesure de l'émission sonore des éoliennes confirment les tendances décrites dans la littérature scientifique :
    - le profil général du spectre d'émission du bruit éolien (décroissance quasi linéaire du niveau sonore avec le logarithme de la fréquence) est retrouvé sur tous les sites, avec peu de différences notables. Quelques raies fréquentielles, probablement attribuables au bruit mécanique dans la nacelle, ont été mises en évidence dans la partie infrasons et basses fréquences du spectre ;
    - plus la vitesse du vent augmente, plus l'émission sonore dans les infrasons et basses fréquences augmente, jusqu'à un maximum théorique ;
- les résultats des mesures de niveaux sonores à 500 m et 900 m (en façade des habitations) des parcs éoliens confirment les tendances observées dans la littérature scientifique pour 2 sites sur les 3 explorés[6] :
    - une forte dispersion des mesures en fonction du temps pour un parc éolien et un régime de vent donné. D'autres facteurs difficilement contrôlables (turbulence ponctuelle du vent, contamination par d'autres sources sonores, etc.) peuvent avoir une influence non négligeable sur le bruit mesuré ;
    - aucun dépassement des seuils d'audibilité dans les domaines des infrasons et basses fréquences n'a été constaté (< 50 Hz) ;
- les signaux infrasons et basses fréquences mesurés à l'intérieur des habitations, dans des conditions où les éoliennes fonctionnaient avec les vitesses de vent les plus élevées (supérieures à 6 m/s) rencontrées au cours des mesures, sont inférieurs au seuil d'audibilité (ISO 226[7]).

Le CES rappelle que les mesures des niveaux de bruit exprimés en dBA, qui sont celles préconisées par les normes techniques, ne sont pas adaptées aux infrasons et basses fréquences sonores. Cependant, le profil particulier du spectre sonore éolien implique une proportionnalité entre le contenu spectral mesuré en dBA et le contenu spectral de la partie infrasons et basses fréquences sonores. Ainsi, des informations pertinentes concernant l'exposition aux infrasons et basses fréquences peuvent être obtenues à partir de données d'exposition mesurées en dBA. Cette constatation rejoint celles dressées par des études récentes.

Ainsi, compte tenu des spectres d'émission des éoliennes actuelles, la limitation d'un niveau sonore en dBA entraîne également une limitation du niveau sonore des infrasons et basses fréquences.

■ Effets des infrasons et basses fréquences sonores sur la santé : exploitation des connaissances scientifiques disponibles

Un déséquilibre entre sources primaires et secondaires

Un examen des données disponibles concernant les effets sanitaires des infrasons permet de constater un fort déséquilibre entre les sources bibliographiques primaires (documents relatifs à des expériences ou études scientifiques originales) et secondaires (revues de la littérature scientifique ou articles d'opinion). En effet, les sources secondaires sont nombreuses alors que le nombre de sources primaires qu'elles sont censées synthétiser est limité. Cette particularité, ajoutée à la divergence très marquée des conclusions de ces revues, montre clairement l'existence d'une forte controverse publique sur cette thématique.

[6] La contribution sonore des éoliennes par rapport aux autres bruits enregistrés au niveau du riverain du site 2 n'a pas pu être établie de façon claire, ce qui a conduit à écarter ce site des analyses.

[7] ISO 226:2003 : Acoustique - Lignes isosoniques normales.

Revue des préoccupations sanitaires exprimées par des riverains de parcs éoliens

Les symptômes décrits par certains riverains de parcs éoliens, qu'ils associent à leur exposition aux émissions sonores des éoliennes, sont extrêmement divers. Ils ont été regroupés dans la littérature en deux catégories :

- ceux associés à la *vibroacoustic disease* (VAD) ;
- ceux constituant le « syndrome éolien » (*wind turbine syndrome* - WTS).

La VAD a été définie par une unique équipe de recherche[8] et désigne un mécanisme biologique particulier qu'elle relie à l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores (croissance dans les matrices extracellulaires de fibres de type collagène et élastine, en l'absence de tout processus inflammatoire). Ce mécanisme pourrait, selon ces auteurs, conduire à terme à l'apparition d'une large diversité d'effets sanitaires (fibroses, atteintes du système immunitaire, effets respiratoires, effets génotoxiques, modifications morphologiques d'organes, etc.).

Le groupe de travail a attribué un très faible niveau de preuve à cette hypothèse de mécanisme d'effets sanitaires, en raison de ses faibles bases scientifiques et des biais importants dans les études publiées par cette équipe dans des revues souvent non soumises à comité de lecture, et dont les résultats n'ont pas été reproduits par d'autres équipes de recherche. Aussi, le groupe de travail n'a pas retenu la VAD dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires potentiels liés aux émissions sonores des éoliennes.

Le syndrome éolien (WTS) a été décrit dans la littérature par Pierpont[9] comme un ensemble de symptômes rapportés par des riverains de parcs éoliens et dont ils attribuent eux-mêmes la cause aux éoliennes. Ces symptômes (troubles du sommeil, maux de tête, acouphènes, troubles de l'équilibre, etc.) ne sont pas spécifiques d'une pathologie. Ils sont notamment retrouvés dans les syndromes d'intolérance environnementale idiopathique. Ils correspondent cependant à un ensemble de manifestations pouvant être consécutives à un stress, à la perte de sommeil, qui peuvent devenir handicapantes pour le sujet qui les ressent.

Bilan des données expérimentales

✓ Des pistes de mécanismes d'effets *via* le système cochléo-vestibulaire, qui restent à confirmer

Les connaissances relatives à la physiologie du système cochléo-vestibulaire récemment acquises ont révélé plusieurs pistes de mécanismes d'effets physiologiques qui pourraient être activés en réponse à une exposition à des infrasons et basses fréquences sonores. Ce système sensoriel dispose en effet d'une sensibilité particulière à ces fréquences, supérieure à celle d'autres parties du corps humain.

Les données actuelles permettent d'évoquer l'hypothèse que des sons de fréquences trop basses ou de niveaux trop faibles pour être clairement audibles pourraient avoir des effets médiés par des récepteurs du système cochléo-vestibulaire. Parmi les mécanismes possibles, on peut citer :

- l'induction de réponses non auditives par les cellules vestibulaires lorsqu'un son de fréquence très basse parvient à la base de la cochlée ;

[8] Équipe de recherche d'Alves-Pereira et Castelo-Branco.

[9] Pierpont, Nina. 2009. *Wind turbine syndrome: A report on a natural experiment*. Traduit par. Edité. Santa Fe: K-Selected Books

- une stimulation « non classique » des cellules sensorielles auditives les plus apicales activant des voies cochléaires non auditives ;
- l'induction de déséquilibres ioniques et volumiques dans les liquides de l'oreille interne, par la mise en vibration globale et prolongée de la membrane basilaire par un son de fréquence très basse ;
- l'induction de modulations de la réponse des cellules sensorielles auditives à des sons ordinaires par des sons très basse fréquence, inaudibles par eux-mêmes mais affectant l'audition des sons audibles concomitants. Certaines particularités, notamment anatomiques, pourraient prédisposer leurs porteurs à des modulations de plus grande intensité ;
- dans l'hypothèse que le dépassement de certains niveaux sonores serait susceptible de générer une stimulation nerveuse au niveau de l'appareil cochléo-vestibulaire (Salt et Hullar, 2010[10]), les niveaux sonores ponctuellement[11] rencontrés dans le cadre des mesures réalisées ont montré que ces niveaux pouvaient être dépassés à l'extérieur des habitations, pour des fréquences inférieures à 20 Hz.

Les phénomènes cités ci-dessus ont été observés expérimentalement à l'aide de sons purs intenses (par exemple une centaine de dB SPL à 200 Hz chez le petit animal de laboratoire, ce qui n'équivaut pas forcément à un son de très basse fréquence chez l'Homme) ; leur existence pour des expositions sonores se rapprochant de celles dues aux éoliennes (sons complexes, de moindre intensité sonore mais de durée prolongée) reste à démontrer.

Le groupe de travail souligne que ces effets physiologiques, souvent évoqués par les associations de riverains de parcs éoliens, ont une signature objective ; par exemple, s'il y a déséquilibre volumique des liquides de l'oreille interne, cela se traduit par des résultats anormaux à des tests ORL, avec une sensibilité et une spécificité élevées. Or, cette signature n'a pour l'instant jamais été recherchée chez les plaignants.

Ces effets physiologiques se traduisent par ailleurs par des manifestations (vertiges, acouphènes, nausées, etc.) que les personnes savent décrire mais qui sont rarement mentionnées, les divers témoignages recueillis au cours de cette expertise décrivent cependant plus fréquemment d'autres types d'effets, tels que des troubles du sommeil et de l'humeur (dépression, stress, anxiété, etc.).

✓ Des effets mal cernés pour les expositions à des infrasons et basses fréquences sonores de très fortes intensités

Les expositions à des infrasons et basses fréquences sonores de très fortes intensités (de 20 à 40 dB plus élevées que celles des éoliennes, donc mettant en jeu des énergies 100 à 10 000 fois supérieures) sont retrouvées dans le milieu professionnel. Cependant, leurs effets font l'objet de controverses (effets peu spécifiques, données mal étayées et/ou anciennes, etc.). La problématique scientifique n'est donc pas élucidée, et les recommandations en matière de limitation des expositions professionnelles publiées ne sont aucunement transposables à la présente saisine.

✓ Des connaissances peu stabilisées quant aux effets des expositions prolongées aux infrasons et basses fréquences de plus faibles niveaux sonores

Il existe très peu de publications soumises à comité de lecture évoquant la problématique des effets potentiels des infrasons et basses fréquences produits par les éoliennes. Cependant,

[10] Salt, Alec N., et Timothy E. Hullar. 2010. "Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines." *Hearing Research* 268 (1):12-21

[11] De quelques % du temps à 8 Hz, à 20 % du temps pour 20 Hz à une distance de 500 m de l'éolienne. Aucune fréquence en dessous de 8 Hz ne dépasse les différents seuils.

quelques études ont été réalisées pour d'autres sources de bruit, telles que des bruits de ventilation, de pompes à chaleur ou de compresseurs, des bruits de trafic routier, etc., pour des intensités de mêmes niveaux que celles émises par les parcs éoliens. Dans ces études, la gêne auto déclarée (questionnaire) constitue le seul effet sanitaire observé. Aucune association n'a été retrouvée avec un marqueur physiologique pouvant identifier un effet sur la santé. Ces études ont néanmoins permis d'établir qu'il faut un niveau sonore beaucoup plus élevé, par rapport à ce qui est connu pour les fréquences plus hautes, pour percevoir un infrason et/ou entendre un son basse fréquence. L'extrapolation des résultats ci-dessus au cas des éoliennes doit être effectuée avec prudence.

✓ **Un effet *nocebo* constaté**

Parallèlement à ces résultats controversés concernant les effets des expositions prolongées aux infrasons et basses fréquences sonores de faibles niveaux, plusieurs études expérimentales, de très bonne qualité scientifique, effectuées en double aveugle et répétées, démontrent l'existence d'effets et de ressentis négatifs chez des personnes pensant être exposées à des infrasons inaudibles alors qu'elles ne le sont pas forcément. Ces effets ou ressentis négatifs seraient causés par les seules attentes d'effets délétères associés à ces expositions.

Cet effet, que l'on peut qualifier de « *nocebo*[12] », contribue à expliquer l'existence de symptômes liés au stress chez des riverains de parcs éoliens. Il doit être d'autant plus important dans un contexte éolien où de multiples arguments d'opposition non exclusivement sanitaires (économiques, culturels, territoriaux, politiques, *etc*.) circulent, véhiculés en particulier par internet et qui peuvent contribuer à la création d'une situation anxiogène.

Néanmoins, l'existence d'un tel effet *nocebo* n'exclut pas *de facto* l'existence d'effets sanitaires qu'il peut potentiellement exacerber.

Bilan des données épidémiologiques

✓ **Des études peu nombreuses et peu concluantes**

Des travaux épidémiologiques devraient permettre de confronter les pistes de mécanismes d'effets physiologiques aux états de santé observés dans les populations riveraines. Malheureusement, ces études sont peu nombreuses et elles se sont exclusivement intéressées aux effets du bruit audible des éoliennes sur la santé des riverains. Il n'en existe aucune qui se soit focalisée sur les effets sur la santé des infrasons ou des sons basse fréquence émis dans l'environnement et plus particulièrement produits par les éoliennes.

Toutes sont des études transversales, et ne permettent donc pas d'affirmer que la cause, c'est-à-dire l'exposition au bruit des éoliennes, a bien précédé l'effet. Les résultats observés dans la majorité de ces études restent marqués par des biais de sélection ou de confusion. Une seule des études analysées peut être considérée comme étant de bonne qualité scientifique. C'est aussi la seule à avoir inclus non seulement des mesures subjectives mais aussi des mesures objectives associées aux effets potentiels auxquels elle s'intéresse. Cette étude ne montre pas d'association entre le niveau de bruit audible dû aux éoliennes et les états de santé auto-déclarés par les répondants (qualité de sommeil, vertiges, acouphènes, migraines et maux de tête fréquents, maladies chroniques comme les cardiopathies, l'hypertension et le diabète), le niveau de stress et

[12] L'effet *nocebo* peut être défini comme l'ensemble des symptômes ressentis par un sujet soumis à une intervention « vécue comme négative » qui peut être un médicament, une thérapeutique non médicamenteuse ou une exposition à des facteurs environnementaux. Cet effet est l'opposé de l'effet *placebo*, défini initialement en médecine comme « *Substance améliorant les symptômes présentés par un malade alors que son efficacité pharmacologiquement prévisible devrait être nulle ou négligeable* ». L'effet du vecteur varie dans les deux cas selon l'attente du sujet.

la qualité de vie perçue. Les mesures objectives des états de santé (concentration de cortisol dans les cheveux, pression artérielle, fréquence cardiaque au repos et qualité de sommeil mesurée) sont cohérentes avec les déclarations des participants. De même, ces mesures ne sont pas associées avec le niveau de bruit audible dû aux éoliennes. En revanche, cette étude montre une association entre ce même niveau de bruit audible et la gêne due à certaines caractéristiques des éoliennes (effet stroboscopique, lumières clignotantes, vibrations, effet visuel).

Le faible nombre d'études réalisées sur cette question et leurs défauts méthodologiques sont autant d'éléments incitant à considérer qu'il n'est actuellement pas possible de conclure quant à l'impact du bruit des éoliennes sur la santé.

Conclusions

- Certains riverains d'éoliennes affirment ressentir des effets sanitaires qu'ils attribuent aux infrasons émis. Parmi ces riverains, des situations de réels mal-être sont rencontrées, et des effets sur la santé parfois constatés médicalement, mais pour lesquels la causalité avec l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores produits par les éoliennes ne peut pas être établie de manière évidente.
- L'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes ne constitue qu'une hypothèse d'explication de ces effets, parmi les nombreuses rapportées (bruit audible, visuels, stroboscopiques, champ électromagnétique, etc.). Cette situation n'est pas spécifique aux éoliennes. Elle peut être rapprochée de celles rencontrées dans d'autres domaines, comme celui des ondes électromagnétiques.

Il est très difficile d'isoler, à l'heure actuelle, les effets sur la santé des infrasons et basses fréquences sonores de ceux du bruit audible ou d'autres causes potentielles qui pourraient être dues aux éoliennes.

La campagne de mesure réalisée par l'Anses :

- confirme que les éoliennes sont des sources de bruit dont la part des infrasons et basses fréquences sonores prédomine dans le spectre d'émission sonore ;
- ne montre aucun dépassement des seuils d'audibilité dans les domaines des infrasons et basses fréquences sonores (< 50 Hz).

Par ailleurs, d'après l'analyse de la littérature :

- les infrasons pourraient être ressentis par des mécanismes cochléo-vestibulaires différents de l'audition à plus hautes fréquences ;
- des effets physiologiques ont été mis en évidence chez l'animal (système cochléo-vestibulaire) pour des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores élevés ;
- ces effets restent à démontrer chez l'être humain pour des expositions de l'ordre de celles liées aux éoliennes chez les riverains (exposition longue à de faibles niveaux d'exposition) ;
- le lien entre des effets physiologiques potentiels et la survenue d'un effet sanitaire n'est pas documenté ;
- les symptômes attendus en cas de perturbation du système cochléo-vestibulaire ne sont généralement pas ceux rapportés par les plaignants ; ils semblent plutôt liés au stress et sont retrouvés dans le syndrome éolien (WTS) ;
- un effet *nocebo* est constaté mais bien entendu n'exclut pas l'existence d'autres effets ;
- en raison de ses faibles bases scientifiques, la « *vibroacoustic disease* » (VAD) ne permet pas d'expliquer les symptômes rapportés ;
- aucune étude épidémiologique ne s'est intéressée à ce jour aux effets sur la santé des infrasons et basses fréquences sonores produits spécifiquement par les éoliennes. À

l'heure actuelle, le seul effet observé par les études épidémiologiques est la gêne due au bruit audible des éoliennes.

Recommandations de l'expertise collective

■ Amélioration du processus d'information des riverains lors de l'implantation des parcs éoliens

En règle générale, l'état de santé de la population dépend en partie de son degré d'information et de participation dans la mise en place d'un projet d'aménagement dans son environnement proche.

Lors de l'implantation d'un parc éolien à proximité d'habitations, le CES recommande :

- de veiller à transmettre des éléments d'information pertinents relatifs aux projets de parcs éoliens au plus tôt (avant enquête publique) aux riverains concernés. La rédaction d'un guide explicitant les informations à transmettre *a minima* en amont de l'enquête publique serait souhaitable ;
- d'améliorer la visibilité des enquêtes publiques ;
- d'étendre le périmètre d'information et de consultation à l'ensemble des riverains potentiellement impactés par le projet (en considération des impacts visuels, sonores, etc.) sans le limiter, comme actuellement, aux seules communes porteuses des projets ;
- de palier l'accès aux très nombreuses informations contradictoires, anxiogènes ou non, disponibles sur internet, en mettant à disposition du grand public un état des connaissances régulièrement actualisé (site internet dédié par exemple) et en indiquant son existence aux riverains potentiellement concernés, en amont de la discussion d'un projet de parc éolien.

Concernant le nécessaire dialogue entre parties prenantes autour de parcs ou de projets de parcs éoliens, le CES recommande :

- de favoriser les concertations en amont des projets de parcs éoliens. En effet, les porteurs de projet demandent d'abord à l'administration le permis de construire en déposant une étude d'impact sur un projet finalisé, et l'enquête publique arrive en fin de processus, minimisant ainsi le poids de cette enquête dans le processus de décision ;
- de mieux définir les interlocuteurs au niveau local et de mieux les impliquer dans le dialogue.

■ Renforcement des connaissances relatives aux expositions des riverains

Afin de faire progresser les connaissances sur les expositions aux infrasons et basses fréquences sonores, et compte-tenu de la complexité de leur mesure, le CES encourage :

- le recours à des méthodes normalisées de mesure des infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes. Les types d'appareils utilisés, le protocole ou la méthodologie à suivre pour réaliser des mesures reproductibles et comparables devront être spécifiés. Le CES souligne que, compte-tenu de la forte corrélation entre le niveau sonore exprimé en dBA et le niveau des infrasons et basses fréquences sonores pour les éoliennes, il pourrait également être intéressant d'utiliser des méthodes d'estimation des infrasons et basses fréquences sonores à partir de mesures en dBA ;
- la conception d'un modèle de prévision des expositions aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes.

Afin d'améliorer la comparabilité entre elles des données d'exposition aux bruits produits par les éoliennes, le CES recommande :

- de développer une méthode expérimentale de caractérisation de la modulation d'amplitude ;
- de déterminer, comme c'est le cas pour le bruit des transports[13], une méthode de calcul unique de prévision du bruit d'éolienne. Elle devra tenir compte des différents paramètres d'influence, à utiliser pour la réalisation de l'étude d'impact sonore dans le cadre de la demande d'autorisation ICPE.

■ Réglementation

Contrôle systématique des émissions sonores des parcs éoliens

Le CES recommande que la puissance sonore des éoliennes soit systématiquement contrôlée *in situ*, avant leur mise en service afin de s'assurer que les caractéristiques sonores des éoliennes installées sont conformes à celles spécifiées dans l'étude d'impact.

À l'exemple des pratiques dans le domaine aéroportuaire, le CES suggère également, dès la mise en service du parc, la mise en place d'un contrôle systématique et continu des niveaux sonores (audibles et dans la gamme des infrasons et basses fréquences) dus au parc, en un ou plusieurs points représentatifs, à la charge de l'exploitant. Une méthode de contrôle simplifiée devra être proposée afin :

- de suivre l'évolution des niveaux sonores par rapport aux valeurs limites réglementaires et, le cas échéant, d'identifier les éventuelles périodes pour lesquelles les valeurs limites réglementaires seraient dépassées et de déterminer leur fréquence de dépassement ;
- de disposer de mesures de bruit à confronter aux journaux de gêne tenus par les riverains et de rechercher les possibles correspondances entre bruit et gêne déclarée.

En cas de dépassements répétés et significatifs des valeurs limites réglementaires, le CES recommande de définir des critères précis conduisant à des actions restant à déterminer (amendes, arrêt forcé, mise en conformité, etc.).

Le CES préconise également la réalisation d'une campagne de mesure de l'impact sonore éolien à l'aide d'une méthode d'expertise telle que définie par la norme Pr S 31-114[14] en cours de rédaction. Le groupe de travail insiste sur l'importance de réaliser des mesures en limite de propriété.

Le CES souligne que ce type de pratiques a contribué à une atténuation des tensions existantes autour des plateformes aéroportuaires, car elle permet d'objectiver les expositions et de mieux répondre aux demandes des riverains.

La nomination d'un interlocuteur privilégié, chargé du suivi de ce contrôle systématique des expositions et de la réponse aux sollicitations des riverains devrait être envisagée.

Valeurs limites

Actuellement, la réglementation requiert notamment une valeur limite d'exposition au bruit en limite de propriété (70 dBA en journée, 60 dBA la nuit) *a priori* peu adaptée aux infrasons et basses

13 NF S 31-133 : Acoustique – Bruit dans l'environnement – Calculs de niveaux sonores.

14 Pr S 31-114 : Mesurage du bruit dans l'environnement avant et après installation éolienne.

fréquences sonores des éoliennes, puisqu'exprimée en dBA.

Cependant, à la distance minimale d'éloignement des éoliennes par rapport aux habitations (500 m actuellement) et considérant le profil particulier des spectres des éoliennes actuellement en fonctionnement, qui permet d'établir une relation entre niveaux en dBA et dBG pour ces sources sonores, le CES considère que les valeurs limites exprimées en dBA peuvent déjà garantir des expositions des riverains (en façade des habitations) aux infrasons et basses fréquences sonores inférieures au seuil d'audibilité communément admis (85 dBG).

Le respect de ces valeurs limites doit donc permettre de prémunir les riverains de toute nuisance potentielle liée à l'audibilité des composantes basses et très basses fréquences du bruit éolien. En revanche, ces valeurs limites ne permettent pas de protéger les riverains d'éventuels effets associés à des infrasons et basses fréquences sonores non audibles, dont l'existence reste cependant encore à démontrer.

Pour réduire les expositions sonores des riverains des parcs éoliens les plus anciens et, compte-tenu des performances acoustiques des turbines les plus récentes, le CES recommande de faciliter le remplacement d'anciennes éoliennes par de nouvelles en simplifiant le processus administratif associé.

- **Amélioration des connaissances concernant les relations entre santé et exposition aux infrasons et basses fréquences sonores**

Études expérimentales

Considérant les pistes de mécanismes cochléo-vestibulaires à l'origine d'effets constatés chez l'animal en laboratoire et l'avancée récente des techniques de mesures physiologiques non invasives qui peuvent être effectuées en quelques dizaines de minutes, le CES recommande la réalisation d'études complémentaires chez l'être humain, à domicile, en utilisant ces techniques.

Les tests déjà validés pour la détection d'une homéostasie anormale des cellules sensorielles cochléaires chez des malades atteints de vertiges de Ménière pourraient donc être utilisés (otoémissions provoquées, otoémissions spontanées, électrocochléographie, vidéonystagmoscopie). Ces tests peuvent tous être pratiqués sur le terrain et répétés sans inconfort. Il est donc concevable de les réaliser chez des sujets, plaignants (individus décrivant des symptômes d'intérêt) ou non, exposés ou non à des sons très basses fréquences en provenance du champ d'éoliennes à proximité duquel ils résident.

La mise en place d'une étude où l'on retrouverait la signature objective d'un effet physiologique chez des plaignants mais pas chez des non-plaignants, et ce, uniquement lorsque le parc éolien serait en fonctionnement, pourrait fournir des éléments de réponse importants. Ces observations permettraient non seulement la concrétisation d'une piste explicative, mais aussi la possibilité d'identifier des personnes à risque, et celle de déterminer le seuil physique au-dessus duquel un risque spécifique émerge.

Études épidémiologiques

L'observation des états de santé des riverains d'éoliennes, grâce notamment à des études épidémiologiques, apparaît comme une piste évidente et complémentaire aux avancées des connaissances attendues sur les mécanismes physiologiques. Réclamée par les associations de riverains, la réalisation de telles études épidémiologiques rencontre néanmoins certaines difficultés d'ordre méthodologique, notamment un problème de puissance statistique en raison du nombre manifestement limité d'individus exposés au bruit audible et inaudible des éoliennes, mais également la survenue d'innombrables biais souvent non contrôlés. Compte-tenu de l'investissement conséquent pour réaliser de telles études, mais également de la possible

pertinence des données qu'elles pourraient générer, le CES appuie la réalisation préalable d'une étude de faisabilité d'une telle étude épidémiologique.

Études psychoacoustiques

Considérant l'importance de l'effet des sons audibles sur la gêne occasionnée par les éoliennes, et compte tenu de lacunes actuelles dans ce domaine, le CES préconise :

- de réaliser des études complémentaires portant sur la sonie de sons complexes basses fréquences (pas uniquement des sons purs) ;
- de développer pour cela un protocole d'étude permettant de quantifier la variabilité interindividuelle de la perception par la réalisation de tests d'audibilité, etc.
- d'améliorer la caractérisation de la gêne liée aux variations temporelles de bruits audibles non stationnaires et aux modulations d'amplitude mais également aux autres facteurs (visuels, vibrations, etc.).

Études en neurosciences

Enfin, compte-tenu des impacts du stress sur la santé et de l'effet *nocebo* mis en évidence, le CES suggère de favoriser la recherche en neurosciences et notamment les études utilisant l'imagerie médicale afin d'identifier les mécanismes impliqués.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 5 décembre 2016

Sigles et abréviations

ACGIH : *Association advancing occupational and environmental health* – Association pour l'amélioration de la santé professionnelle et environnementale (États-Unis)

Acnusa : Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires.

Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

Afsse : Agence française de sécurité sanitaire environnementale

CCE : Cellules ciliées externes

CCI : Cellules ciliées internes

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

CFST : Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail (Suisse)

CIOP : *Central institute for labour protection* - Institut central pour la sécurité au travail (Pologne)

Cired : Centre international de recherche sur l'environnement et le développement

CLER : Comité de liaison énergies renouvelables

CNDP : Commission nationale du débat public

CNRS : Centre national de recherche scientifique

CSPE : Contribution au service public de l'électricité

DEPA : *Danish environmental protection agency* - Agence danoise de protection de l'environnement (Danemark)

DGPR : Direction générale de la prévention des risques

DGS : Direction générale de la santé

Dreal : Direction générale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

HPA : *Health protection agency* – Agence britannique de protection de la santé (Grand-Bretagne)

IBF : Infrasons et basses fréquences

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

Ifsttar : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

INRS : Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

Inserm : Institut national de la santé et de la recherche médicale

INSPQ : Institut national de santé publique du Québec (Canada)

NHMRC : *National health and medical research council* - Conseil national australien de la santé et de la recherche médicale (Australie)

NZOSHS : *New Zealand occupational health and safety* - Agence d'hygiène et de sécurité au travail (Nouvelle Zélande)

LPO : Ligue de protection des oiseaux

LUBW : *Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden*-Württemberg - Office de l'environnement, des mesures et de la protection de la nature du Land de Bade-Wurtemberg

OMS : Organisation mondiale de la santé

PCAET : Plan climat air énergie territorial

PCET : Plan climat-énergie territorial

SA EPA : *South australia environmental protection agency* – Agence de protection de l'environnement de l''État de l'Australie du sud (Australie)

SPL : *Sound Pressure Level* – Niveau de pression acoustique

SRCAE : Schéma régional climat air énergie

SRE : Schéma régional éolien

WTS : *Wind turbine syndrome* – syndrome éolien

WWF : *World Wildlife Fund* – Fond mondial pour la nature

ZED : Zones de développement éolien

ZNI : Zone non interconnectées

Glossaire

Bruit ambiant

Bruit total existant dans une situation donnée pendant un intervalle de temps donné. Il est composé de l'ensemble des bruits émis par toutes les sources proches ou éloignées (cf. norme NF S 30-101).

Bruit fluctuant

Bruit dont le niveau sonore varie sur un intervalle de plus de 2 décibels (dB) au cours de la durée d'observation (cf. norme NF S 30-101).

Bruit particulier

Composante du bruit ambiant pouvant être identifiée spécifiquement et que l'on désire distinguer du bruit ambiant, notamment parce qu'il est l'objet d'une requête. Ce peut être, par exemple, un bruit dont la production ou la transmission est inhabituelle dans une zone résidentielle ou un bruit émis ou transmis dans une pièce d'habitation du fait du non-respect des règles d'art de la construction ou des règles de bon usage des lieux d'habitations (cf. norme NF S 30-101).

Bruit résiduel

Résultante du bruit ambiant en l'absence de tous les bruits particuliers. Ce peut être par exemple, dans un logement, l'ensemble des bruits habituels provenant de l'extérieur et des bruits intérieurs correspondant à l'usage normal des locaux et équipements (cf. norme NF S 30-101).

Décibel *(Noté dB)*

Unité permettant d'exprimer des niveaux (de pression, de puissance, d'intensité). Le décibel est construit à partir du logarithme décimal du rapport entre l'énergie du signal étudié et une valeur de référence[15].

Émergence

Modification temporelle du niveau du bruit ambiant induite par l'apparition ou la disparition d'un bruit particulier. Cette modification porte sur le niveau sonore global ou sur le niveau sonore mesuré dans une bande de fréquence quelconque (NF S 30-101)].

L'émergence (E) est obtenue en comparant le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit ambiant en présence du bruit particulier à caractériser, au niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit résiduel tel que déterminé sur l'intervalle d'observation.

Fréquence

La fréquence, exprimée en Hertz (Hz), représente le nombre de fois qu'une grandeur se reproduit identiquement à elle-même en une seconde (c'est l'inverse de la période).

Par exemple, un son pur de 1 000 Hz entraîne la vibration des molécules d'air 1 000 fois par seconde.

[15] Cette valeur de référence est le seuil d'audition de l'oreille humaine à la fréquence de 1 000 Hz exprimé soit en pression acoustique ($p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa) soit en intensité acoustique ($I_0 = 10^{-12}$ W).

Intensité (ou puissance) du bruit

L'intensité ou la puissance du bruit représente les variations de pression de l'air ambiant dues à la présence de vibrations sonores, exprimées en Pascal (Pa).

La pression la plus basse qu'un être humain en bonne santé puisse détecter est de 20 micro-pascals (µPa). La pression la plus élevée qui puisse être perçue sans dommage par le système auditif humain est de 20 Pascals.

Son

Le son est un phénomène vibratoire présentant trois caractéristiques : un spectre fréquentiel, une amplitude et une durée (durée de l'émission).

Liste des tableaux

Tableau 1 : échelle des fréquences sonores 39

Tableau 2 : l'éolien parmi les sources de production d'électricité en France fin 2015 (RTE 2016) 49

Tableau 3 : estimation des territoires et populations en France métropolitaine situés à une distance de moins de 1 km et 1,5 km d'une éolienne (source : association Vent de Colère !) 56

Tableau 4 : répartition des emplois de la filière éolienne française fin 2014 (source : (FEE-BearingPoint 2015)) 58

Tableau 5 : valeurs limites des niveaux sonores mesurés à l'extérieur des constructions en Allemagne (*TA Lärm*) 76

Tableau 6 : valeurs limites pour les bruits basses fréquences (norme DIN 45680) en Allemagne (périodes de nuit et de la journée) 77

Tableau 7 : valeurs limites à une distance de 15 mètres du bâtiment d'habitation le plus exposé au bruit au Danemark 78

Tableau 8 : valeurs limites recommandées au Danemark pour les basses fréquences et infrasons mesurés à l'intérieur des constructions 78

Tableau 9 : valeurs limites recommandées au Danemark pour les vibrations mesurées à l'intérieur des constructions 79

Tableau 10 : valeurs limites de bruit éolien en Finlande 79

Tableau 11 : valeurs limites d'exposition au bruit dans les domiciles par bande de fréquences en Finlande 80

Tableau 12 : seuils recommandés au Royaume-Uni par le DEFRA pour l'exposition aux bruits de basses fréquences mesurées aux domiciles en période nocturne (23h-7h) 81

Tableau 13 : courbe de référence pour les bruits basses fréquences (20-100 Hz) préconisée par la Fondation néerlandaise sur la gêne due au bruit 82

Tableau 14 : courbe de référence pour les basses fréquences (10-250 Hz) à l'intérieur des habitations en Pologne 83

Tableau 15 : valeurs limites recommandées au voisinage de parcs éoliens en Suède 83

Tableau 16 : valeurs limites de bruit à l'intérieur des constructions en Suède 84

Tableau 17 : courbe de référence pour les bruits de basses fréquences (31,5 – 200 Hz) à l'intérieur des habitations en Suède 84

Tableau 18 : valeurs limites d'exposition au bruit éolien en Suisse 85

Tableau 19 : valeurs limites de bruit éolien par bandes d'octave pour une zone résidentielle pour l'État d'Illinois (USA) 91

Tableau 20 : valeurs limites de bruit éolien par bandes d'octave en limite de propriété des habitations dans le comté de Shawano (Wisconsin-USA) 91

Tableau 21 : valeurs guides de bruit éolien (en dB) par bandes d'octave en limite de propriété des habitations dans le comté de Calumet (Wisconsin-USA) 91

Tableau 22 : valeurs limites d'exposition en limite de site industriel au Japon 93

Tableau 23 : valeurs de référence pour les bruits de basses fréquences en vigueur au Japon 93

Tableau 24 : valeurs limites en Lden pour le bruit ferroviaire applicables au Danemark 94

Tableau 25 : valeurs limites recommandées au Danemark pour le bruit basses fréquences de ferrys grandes vitesses à l'intérieur des logements 95

Tableau 26 : critères suédois de classification de confort sonore à l'intérieur des logements pour les bruits d'équipements collectifs 96

Tableau 27 : critères suédois de classification de confort sonore à l'intérieur des logements pour les sources de bruit extérieur 96

Tableau 28 : niveaux équivalents (L_{eq} en dB) dans les chambres à coucher et les locaux de repos 96

Tableau 29 : valeurs guides suédoises de confort dans les constructions pour les vibrations 96

Tableau 30 : valeurs guides et valeurs limites suédoises pour les constructions au voisinage des infrastructures de transport ferroviaire 97

Tableau 31 : valeurs guides suédoises pour les bruits solidiens rayonnés par les structures 97

Tableau 32 : valeurs guides suisse pour le bruit solidien ferroviaire à l'intérieur des locaux 98

Tableau 33 : caractéristiques du parc éolien de la Motelle 132

Tableau 34 : caractéristiques du parc éolien du Val de Noye 133

Tableau 35 : caractéristiques du parc éolien Énergie du Porcien 134

Tableau 36 : valeurs limites en France* après transposition de la Directive 2002/49/CE 249

Tableau 37 : occurrence des qualificatifs du bruit éolien dans les descriptions qualitatives (d'après (Pedersen et Persson Waye 2004)) 252

Tableau 38 : types d'attitudes personnelles face à la source sonore et sens de l'influence sur la gêne ressentie (d'après (McGuire 2008)) 257

Tableau 39 : échantillons sonores utilisés dans le cadre de l'évaluation des paramètres psychoacoustiques 258

Tableau 40 : correction C due à l'influence de la protection complète + plaque sur la réponse fréquentielle du dispositif de mesure 278

Liste des figures

Figure 1 : exemples de niveaux de bruit rencontrés dans l'environnement 40

Figure 2 : courbes d'isosonies (Fletcher et Munson 1933) 41

Figure 3 : courbes de pondération A, B, C et D (source : http://www.inrp.fr) 42

Figure 4 : courbe de pondération G (source : (Chatillon 2006)) 42

Figure 5 : éléments d'une éolienne 43

Figure 6 : exemple de résultat de mesures du bruit autour dun parc éolien (extérieur) pour des conditions de fonctionnement et d'arrêt des turbines. Source : (Zajamšek *et al.* 2016) 44

Figure 7 : variation temporelle du bruit d'éoliennes ($L_{Aeq\ 10min}$) (source : (SouthAustralia-EPA 2013)) 45

Figure 8 : exemple de bruit mesuré en extérieur et du spectre de bruit de l'instrument (source : (Horonjeff et Ross 2002)) 46

Figure 9 : comparaison des spectres enregistrés en façade et en intérieur d'un bâtiment et identification du mode de résonnance en intérieur lié à la géométrie de la pièce (« *room mode* ») (source : (Zajamšek *et al.* 2016)) 47

Figure 10 : variation de mesures du niveau sonore en fonction du point de mesure et des fréquences (source : (Oliva *et al.* 2011)) 48

Figure 11 : puissance éolienne dans l'Union européenne fin 2015 (EurObserv'ER 2016) 50

Figure 12 : puissance éolienne pour 1 000 habitants dans les pays de l'Union européenne en 2015 (kW/1 000 hab) (EurObserv'ER 2016) 50

Figure 13 : répartition des parcs éoliens en France métropolitaine en fonction du nombre d'éoliennes (source : the windpower.net, site consulté en juin 2014) 51

Figure 14 : répartition des puissances unitaires des éoliennes en France métropolitaine (source : the windpower.net, consulté en juin 2014) 52

Figure 15 : répartition du parc éolien par marques d'éoliennes installées en France métropolitaine (31 décembre 2015) (source : base de données FÉE) 52

Figure 16 : puissance éolienne en France (fin septembre 2015). Source : (Observ'ER 2015) 53

Figure 17 : évolution du parc éolien en France et objectifs nationaux (source : tableau de bord éolien du Ministère du développement durable - premier trimestre 2016) 54

Figure 18 : évolution de la puissance totale du parc éolien en France métropolitaine (courbe rouge) et de la puissance annuelle raccordée (barres bleues). Source : (FEE-BearingPoint 2015) 55

Figure 19 : évolution du nombre d'emplois directs (en équivalent temps plein) dans le secteur de l'éolien en France. Source : (Observ'ER 2015) 58

Figure 20 : représentation graphique du périmètre de mesure pour un parc éolien 73

Figure 21 : comparaison de la valeur limite de 85 dBG préconisée par le DERM avec celui de l'audition humaine et le seuil fixé par la norme DIN 45680 entre 0,5 et 20Hz 87

Figure 22 : résumé des valeurs limites en vigueur dans les différents États et comtés aux États-Unis. 90

Figure 23 : de la source de bruit à l'exposition de l'environnement 100

Figure 24 : visualisation des principales sources sonores d'une éolienne 102

Figure 25 : principaux éléments mécaniques générateurs de bruit dans la nacelle 102

Figure 26 : illustration de la présence de composantes tonales basses fréquences dues à la boite de vitesse (*Gear tone*). 103

Figure 27 : écoulement d'air autour d'une pale d'éolienne 104

Figure 28 : principaux mécanismes de formation des turbulences génératrices de bruit 105

Figure 29 : contributions relatives des bruits aérodynamiques de pale au bruit total 105

Figure 30 : dispositif de réduction du bruit appelé « serrations » 106

Figure 31 : exemple de spectre mesuré a 2,5 km de 4 éoliennes. Les pics rouges sont dus aux éoliennes. La ligne bleue est le bruit de fond du site 107

Figure 32 : exemples de puissance acoustique d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent (gauche) et de sa puissance électrique nominale (droite) 107

Figure 33 : exemple de la forme du spectre de puissance d'une éolienne (puissance électrique nominale 2 MW)..... 108

Figure 34 : exemple de directivité horizontale d'une éolienne (niveau sonore global moyenné sur plusieurs révolutions de rotor) 109

Figure 35 : niveau sonore du bruit du vent au niveau d'un microphone équipé d'une protection anti-vent, en fonction de la vitesse du vent..... 110

Figure 36 : comparaison entre le niveau sonore du bruit du vent (V=4,4 m/s) dans des peupliers..... 111

Figure 37 : décroissance spatiale pour une éolienne unique et pour une distribution de 9 éoliennes en ligne (hauteur de nacelle : 80 m, hauteur de récepteur : 2 m) 113

Figure 38 : atténuation (dB/100m) due à l'absorption atmosphérique en fonction de la température (gauche) et de l'humidité relative de l'air (droite) 114

Figure 39 : conditions homogènes (a), favorables (b), et défavorables (c) à la propagation acoustique 115

Figure 40 : influence du vent, pour une température homogène (gauche) et influence de la température, en l'absence de vent (droite), sur la propagation du son..... 115

Figure 41 : illustration de la présence de rebonds multiples lors de conditions favorables à la propagation 116

Figure 42 : influence du sol sur la propagation des ondes sonores..... 117

Figure 43 : niveau sonore additionnel dû à l'effet de sol 118

Figure 44 : influence de l'effet de sol sur sol accidenté..... 119

Figure 45 : influence de l'effet de végétation lorsque la source apparente est haute (à gauche : effet négligeable) et basse (à droite : effet possible)..... 120

Figure 46 : exemple de modification de la propagation acoustique due à la modification de la température engendrée par la forêt (source routière), le jour ou la nuit 120

Figure 47 : vue des éoliennes depuis la plaine (à 950 m) – exemple de simulation des niveaux sonores .. 122

Figure 48 : exemple de carte de bruit des contributions sonores 122

Figure 49 : Comparaison entre les niveaux sonores (dBA) calculés avec trois modèles d'ingénierie, à différentes distances d'une éolienne, pour des conditions favorables et défavorables à la propagation. 124

Figure 50 : comparaison entre les spectres (dB) calculés avec trois modèles d'ingénierie, à 500 m d'une éolienne, pour des conditions favorables et défavorables à la propagation..... 125

Figure 51 : exemples de spectre de vibration d'une éolienne 126

Figure 52 : positionnement du parc de la Motelle (source : Géoportail) 133

Figure 53 : positionnement du parc du Val de Noye (source : Géoportail) 134

Figure 54 : positionnement du parc du Porcien (source : Géoportail)..... 135

Figure 55 : schéma de principe de la localisation des points de mesure acoustique (A_{eol}, A_{500}, A_{ext}, A_{int}) et météorologique (M)..... 136

Figure 56 : point de mesure de la puissance acoustique apparente de l'éolienne (point A_{eol}) avec sa protection anti-vent 137

Figure 57 : exemples de points de mesure en façade de bâtiment 138

Figure 58 : mât météorologique de 10 m de hauteur (à gauche) comportant un anémomètre à ultrasons 3D (à droite), installé au point M..... 139

Figure 59 : niveaux de puissance acoustique médians en fonction de la vitesse du vent, exprimés en dBA (à gauche) et en dBG (à droite). 141

Figure 60 : niveau de puissance acoustique en fonction de la vitesse du vent à 10 m, exprimé en dBA (haut) et en dBG (bas). 141

Figure 61 : spectres de puissance acoustique (L50) médians, en fonction de la vitesse du vent. 142

Figure 62 : spectres de puissance acoustique médians pour les plus fortes conditions de vent rencontrées (traits pleins). Vitesse de vent à 10 m : [6-7] m/s 142

Figure 63 : niveau sonore à 500 m de l'éolienne (L_{50}) en fonction du niveau de puissance de l'éolienne (L_W), exprimés en dBA (haut) et en dBG (bas). 144

Figure 64 : niveau sonore à l'extérieur du logement d'un riverain (L_{50}) en fonction du niveau de puissance de l'éolienne (L_W), exprimés en dBA (haut) et en dBG (bas) 144

Figure 65 : niveau sonore à 500 m de l'éolienne (L_{50}) en fonction de la vitesse du vent à 10 m, exprimé en dBA (haut) et en dBG (bas). 145

Figure 66 : niveau sonore à l'extérieur du logement du riverain (L_{50}), en fonction de la vitesse du vent à 10 m, exprimé en dBA (haut) et en dBG (bas). 145

Figure 67 : médianes des spectres à 500 m (rouge) et à l'extérieur de l'habitation (vert) 146

Figure 68 : spectre des niveaux sonores à 500 m et 900 m, en fonction des classes de vitesse de vent à 10 m et des conditions de propagation. 147

Figure 69 : spectres médians et dispersion associée, toutes conditions de vent et de propagation confondues 147

Figure 70 : spectres médians à 500 m et à 900 m/950 m, et dispersion associée, pour les sites 1 et 3, en fonction de la vitesse du vent 148

Figure 71 : isolement brut de la façade des bâtiments 149

Figure 72 : spectres médians à l'extérieur (noir) et à l'intérieur (rouge) du logement 150

Figure 73 : comparaison des spectres médians (rouge) aux seuils d'audibilité (ISO 226), au seuil de Salt et au seuil de Moorhouse 151

Figure 74 : pourcentages de temps de dépassement des seuils constatés lors de la campagne de mesure, pour chaque tiers d'octave 152

Figure 75 : corrélations entre les niveaux sonores estimés en dBG et les niveaux sonores estimés en 153

Figure 76 : structures sensorielles de la cochlée 179

Figure 77 : onde propagée le long de la membrane basilaire cochléaire 182

Figure 78 : anatomie de la cochlée et du vestibule 186

Figure 79 : illustration de la force de fluctuation 254

Figure 80 : niveaux de gene en fonction du niveau de pression acoustique et de la fréquence du bruit (Møller et Lydolf 2002) 255

Figure 81 : impact des niveaux de bruit pondérés A, de l'attitude visuelle et générale pour la gêne sonore (Pedersen et Persson Waye 2007) 255

Figure 82 : habituation du système nerveux autonome (Har) et émotionnel 257

Figure 83 : modulation d'amplitude à 150 m pour le parc éolien du Porcien 259

Figure 84 : modulation d'amplitude à 500 m pour le parc éolien du Porcien 259

Figure 85 : spectres à 150 m pour le parc éolien du Porcien 260

Figure 86 : analyse de la bruyance du signal pour le parc éolien du Porcien 260

Figure 87 : analyse de la rugosité du signal pour le parc éolien du Porcien 261
Figure 88 : analyse de l'acuité du signal pour le parc éolien du Porcien 261
Figure 89 : localisation des capteurs 263
Figure 90 : profil altimétrique entre l'éolienne et le riverain (0 km=position de l'éolienne) 263
Figure 91 : histogrammes des vitesses et directions du vent durant la période d'observation. Site 1 263
Figure 92 : roses des vents à 10 m de hauteur 264
Figure 93 : histogrammes des vitesses de vent à 10 m de hauteur 264
Figure 94 : spectres médians de puissance de l'éolienne, en fonction des vitesses de vent. 265
Figure 95 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent 265
Figure 96 : spectres médians du niveau sonore à 900 m (exterieur), en fonction de la vitesse de vent 266
Figure 97 : spectres médians du niveau sonore à 900 m (intérieur), en fonction de la vitesse de vent 266
Figure 98 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et le spectre de puissance acoustique de l'éolienne 267
Figure 99 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et la vitesse de vent. 267
Figure 100 : localisation des capteurs 268
Figure 101 : profil altimétrique entre l'éolienne et le riverain (0 km=position de l'éolienne) 268
Figure 102 : histogrammes des vitesses et directions du vent durant la période d'observation. Site 2 268
Figure 103 : roses des vents à 10 m de hauteur 269
Figure 104 : histogrammes des vitesses de vent à 10 m de hauteur 269
Figure 105 : spectres médians de puissance de l'éolienne, en fonction des vitesses de vent 270
Figure 106 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent 270
Figure 107 : spectres médians du niveau sonore à 850 m (exterieur), en fonction de la vitesse de vent 271
Figure 108 : spectres médians du niveau sonore à 850 m (intérieur), en fonction de la vitesse de vent 271
Figure 109 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et le spectre de puissance acoustique de l'éolienne 272
Figure 110 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et la vitesse de vent 272
Figure 111 : localisation des capteurs 273
Figure 112 : profil altimétrique entre l'éolienne et le riverain (0km=position de l'éolienne) 273
Figure 113 : histogrammes des vitesses et directions du vent durant la période d'observation. Site 3 273
Figure 114 : roses des vents à 10 m de hauteur 274
Figure 115 : histogrammes des vitesses de vent à 10 m de hauteur 274
Figure 116 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent (..... 275
Figure 117 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent 275
Figure 118 : spectres médians du niveau sonore à 950 m (exterieur), en fonction de la vitesse de vent 276
Figure 119 : spectres médians du niveau sonore à 950m (interieur), en fonction de la vitesse de vent 276

Figure 120 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et le spectre de puissance acoustique de l'éolienne 277

Figure 121 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et la vitesse de vent 277

Figure 122 : dispositif de mesure de l'émission acoustique avec (droite) et sans (gauche) protection secondaire 278

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

Le développement des éoliennes comme source d'énergie électrique renouvelable a conduit à s'interroger sur leur potentialité à produire des sons de basses fréquences (20 Hz à 200 Hz) et des infrasons (inférieurs à 20 Hz) pouvant avoir des conséquences pour la santé humaine.

En mars 2006, l'Académie nationale de médecine a considéré, dans un rapport concernant le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'Homme, que l'impact sonore des parcs éoliens était comparable à celui des aéroports, des infrastructures de transports ou des usines. Ce rapport recommandait une classification des parcs éoliens en « zone industrielle » et une distance minimale d'implantation de 1 500 mètres des habitations.

Saisie alors par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) pour étudier les impacts sanitaires du bruit engendré par les éoliennes, l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse) avait conclu, dans son rapport « Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes » de mars 2008, que les émissions sonores des éoliennes n'avaient pas de conséquences sanitaires directes tant au niveau de l'appareil auditif que des effets liés à l'exposition aux basses fréquences et aux infrasons. Ce rapport considérait également que l'énoncé systématique d'une distance minimale d'éloignement de 1 500 mètres, sans prendre en compte l'environnement (notamment topographique) du parc éolien, ne semblait pas pertinent.

La réglementation relative aux éoliennes a depuis été modifiée (cf. § 3.1) avec l'introduction de distances minimales d'implantation de 500 mètres de toute habitation puis le classement des parcs éoliens dans le régime des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE, textes du 26 août 2011). Ces textes prévoient des mesures de bruit dans les bandes d'octave de 125 à 4 000 Hz. Les très basses fréquences et les infrasons, plus difficiles à mesurer, ne sont actuellement pas pris en compte.

Des plaintes de riverains concernant le bruit des éoliennes ont été signalées à la DGPR par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL). Ces plaintes concernent notamment le site de Saint-Servant-sur-Oust (56), et, pour une gêne spécifiquement liée aux basses fréquences et aux infrasons, le site de Freycenet-la-Tour-Moudeyres (43).

1.2 Objet de la saisine

L'Anses a été saisie le 4 juillet 2013 par la Direction générale de la prévention des risques et la Direction générale de la santé afin d'établir une base de connaissances étayée et parvenir à des conclusions solides concernant les effets sur la santé des basses fréquences et des infrasons dus aux parcs éoliens. La demande exprimée dans la saisine (voir Annexe 1) portait sur les points suivants :

- conduire une revue des connaissances disponibles en matière d'effets sanitaires auditifs et extra-auditifs dus aux parcs éoliens, en particulier dans le domaine des basses fréquences et des infrasons ;

- étudier les réglementations mises en œuvre dans les pays, notamment européens, confrontés aux mêmes problèmatiques ;
- mesurer l'impact sonore de parcs éoliens, notamment de ceux où une gêne est rapportée par les riverains, en prenant en compte les contributions des basses fréquences et des infrasons ;
- proposer des pistes d'amélioration de la prise en compte des éventuels effets sur la santé dans la réglementation, ainsi que des préconisations permettant de mieux appréhender ces effets sanitaires dans les études d'impact des projets éoliens.

1.3 Champ de l'expertise

1.3.1 Sources de bruit et gammes de fréquences

Les sources sonores considérées dans le cadre de cette expertise pour l'évaluation des risques sanitaires sont les aérogénérateurs, ou éoliennes, installés sur terre *(onshore*). Les éoliennes installées en mer *(offshore*) sont en dehors du champ de l'expertise du fait de leurs spécificités (technologies employées, contextes et problématiques) mais également de l'absence de ce type de parc éolien installé en France à la date de début des travaux d'expertise.

Seuls les domaines fréquentiels des infrasons (< 20 Hz) et des basses fréquences sonores (20 – 200 Hz) sont considérés.

1.3.2 Effets sanitaires

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) définit la santé comme « un état de complet bien-être physique, mental et social » et pas seulement comme « une absence de maladie ou d'infirmité » (OMS 1986). Les effets sanitaires répondant à cette définition de la santé sont considérés dans la présente expertise.

1.3.3 Population

Le champ de l'expertise concerne la population générale riveraine des installations éoliennes.

1.4 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Effets sur la santé des basses fréquences et infrasons dus aux parcs éoliens », rattaché au comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements » l'instruction de cette saisine.

La réalisation des travaux s'est principalement appuyée sur la synthèse et l'analyse critique des données publiées dans la littérature (articles scientifiques, rapports, *etc*.).

Les experts du groupe de travail ont également auditionné un certain nombre de parties prenantes et de personnalités extérieures de manière à recueillir des informations et des données complémentaires utiles pour l'expertise (contexte, effets sanitaires, *etc*.).

Enfin, deux travaux complémentaires ont été sollicités, dans le cadre de conventions de recherche et développement :

- un premier avec le Centre d'information et de documentation sur le bruit (CIDB), qui a réalisé une revue de la réglementation en vigueur relative aux bruits de basses fréquences, s'appliquant aux éoliennes en France en particulier et à l'international ;
- un second avec le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) portant sur l'analyse du contexte socio-économique entourant l'implantation des parcs éoliens.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES et a été validé le 5 décembre 2016.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) »

1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

2 Éléments de contexte

2.1 Généralités sur l'acoustique

2.1.1 Définitions du bruit

Le bruit, caractérisable par des paramètres physiques (dimension physique du bruit), est perceptible par l'appareil auditif (dimension physiologique) et interprété par l'individu exposé (dimension psychosociologique).

Un son est par définition une onde produite par une vibration mécanique des molécules d'un milieu autour de leur position d'équilibre. Lorsque l'onde progresse, seule l'énergie est transmise ; hormis pour des niveaux sonores très importants (qui ne concerne pas l'objet de ce rapport), il n'y a pas de transport de matière. Plus le milieu est dense, plus la vitesse de propagation du son est rapide.

Un son pur est défini par trois paramètres :

- son amplitude, correspondant aux variations de pression de l'air ambiant lors du passage de l'onde sonore, exprimée sur une échelle linéaire en Pascal (Pa) (allant de 10^{-5} à 60 Pa pour le domaine audible) ou sur une échelle logarithmique en décibel (dB) (allant de 0 dB à 130 dB) ;
- sa durée d'émission, exprimée en secondes (s) ;
- sa fréquence, correspondant au nombre de vibrations par seconde de l'onde sonore, exprimée en Hertz (Hz) : le son est aigu si la fréquence est élevée (vibrations rapides, c'est-à-dire longueurs d'onde courtes) et grave si la fréquence est faible (vibrations lentes, c'est-à-dire grandes longueurs d'onde) (Tableau 1). On appelle période l'inverse de la fréquence.

Tableau 1 : échelle des fréquences sonores

Infrasons	Sons audibles (par l'Homme)	Ultrasons
< 20 Hz	20 à 20 000 Hz dont les fréquences de la parole : 250 à 4 000 Hz	> 20 000 Hz

L'oreille humaine peut percevoir une grande variété de sons, du son aigu d'un sifflement d'une bouilloire jusqu'au son grave de l'orage qui gronde. Les sons sont donc perçus selon leur niveau sonore mais aussi selon leur hauteur tonale.

À la différence d'un son pur, le bruit est constitué par un ensemble de fréquences d'intensités variables, définissant son contenu spectral. Il n'est pas simplement perçu par l'appareil auditif : il peut être interprété, chargé de sens, associé par ceux qui y sont exposés à des causes et à des effets supposés et devenir un sujet de gêne ou de préoccupation. Cette construction psychosociologique du bruit fait intervenir non seulement le bruit perçu, mais également d'autres déterminants parmi lesquels des caractéristiques sociales, culturelles et axiologiques (c'est-à-dire les valeurs morales) propres aux individus (Anses 2013).

2.1.2 Niveaux de pression acoustique et unités

Le traitement acoustique réalisé par l'appareil auditif n'est pas linéaire : la sensation auditive varie comme le logarithme de la pression acoustique ou de l'intensité sonore. De plus, la plage de variation de la pression acoustique perceptible par l'appareil auditif humain étant relativement étendue, de l'ordre de 10^6 entre la pression minimale et la pression maximale, il est usuel de réduire ce domaine en passant de l'échelle linéaire à une échelle logarithmique (en logarithme décimal, log) exprimée en décibel (dB).

Si l'on veut additionner deux ou plusieurs bruits, on ne peut le faire qu'en revenant à l'expression linéaire des puissances acoustiques qui, seules, s'additionnent algébriquement. Ainsi, deux sons de même niveau de pression acoustique émis conjointement donnent un niveau de pression acoustique final augmenté de 3 dB (10xLog(2)) et non la somme algébrique des deux niveaux de pression acoustique exprimés en dB.

Quelques exemples de niveaux de pression acoustique rencontrés dans l'environnement sont présentés sur la figure suivante :

Source : Service de protection contre le bruit et les rayonnements non ionisants du canton de Genêve.

Figure 1 : exemples de niveaux de bruit rencontrés dans l'environnement

2.1.3 Sons basses fréquences, infrasons, vibrations

- **Basses fréquences**

On considère généralement que les sons de basses fréquences (sons graves) se situent entre 20 Hz et 200 Hz, mais cette définition reste arbitraire.

- **Infrasons**

Les sons de fréquences inférieures à 20 Hz sont habituellement appelées « infrasons », même si la frontière entre les infrasons et les sons de basses fréquences est floue. Les infrasons sont parfois définis comme étant des sons inaudibles, mais cette définition est incomplète car leur audibilité dépend en réalité du niveau sonore. Par rapport à des sons de fréquences plus élevées, il faut un niveau sonore beaucoup plus important pour que des sons de basses fréquences soient

entendus (voir Figure 2). Par exemple, à 10 Hz, le son doit avoir un niveau sonore d'au moins 97 dB pour être audible[16].

- **Vibrations**

Bien que le son corresponde physiquement à la vibration d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide dans lequel il se propage, le terme vibration est généralement réservé au cas des solides.

On dit qu'un objet vibre quand il y a déformation et oscillation de celui-ci autour d'une position de référence, sa position d'équilibre, par exemple un diapason. Une vibration peut *in fine* être à l'origine d'une émission sonore dans l'air.

2.1.4 Usage d'une pondération fréquentielle

Pour tenir compte des différences de sensation provoquées par des sons de fréquence et d'intensité différentes, il est usuel d'ajouter une pondération fréquentielle au spectre d'un son mesuré ou calculé.

Ces pondérations reposent sur les courbes d'isosonies de Fletcher et Munson (voir Figure 2) qui traduisent l'égalité de sensation de niveau sonore pour des sons purs, en fonction de la fréquence (Fletcher et Munson 1933). Par définition, un son de *n* phone(s) (cf. ci-dessous) produit la même sensation qu'un son de *n* décibel(s) à 1 000 Hz. Une ligne isosonique correspond à l'ensemble des sons purs qui produisent la même intensité. La courbe isosonique de phone 0 correspond au seuil d'audibilité (moyenne pour une personne adulte, jeune et en bonne santé). Ce seuil à 20 Hz dépasse 70 dB.

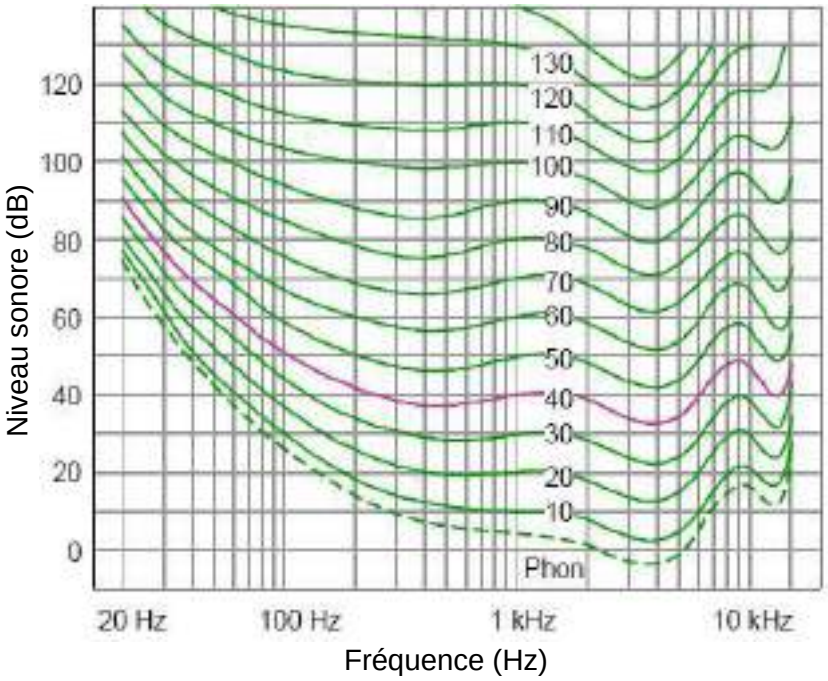


Figure 2 : courbes d'isosonies (Fletcher et Munson 1933)

L'organisation internationale de normalisation (ISO) a normalisé ces courbes (ISO/R 226:1961) qui ont servi à établir les principales pondérations fréquentielles (illustrées en Figure 3) de la manière suivante :

- dBA pondéré par la courbe de Fletcher à 40 phones (bruits faibles) ;

[16] Audibilité moyenne pour une personne adulte, jeune et en bonne santé (voir Figure 2).

- dBB pondéré par la courbe de Fletcher à 70 phones (bruits moyens) ;
- dBC pondéré par la courbe de Fletcher à 100 phones (bruits forts),

Les dB non pondérés sont encore appelés dBLin ou dBZ.

La pondération A est la plus utilisée. Elle vise à procurer une évaluation sommaire du niveau sonore tel que perçu par l'être humain. Ce filtre A atténue fortement les basses fréquences par rapport aux fréquences moyennes et hautes. Cette échelle de pondération A est utilisée pour la conformité réglementaire environnementale. En revanche, elle ne permet pas de caractériser pleinement les sons riches en basses fréquences.

La pondération C rend moins compte de la sonie globale, contrairement à l'approche sommaire qu'en effectue le dBA, et se rapproche davantage d'une évaluation de puissance acoustique non différenciée en fréquence. Dans la pratique, le dBC est peu utilisé seul. On le voit surtout utilisé conjointement avec le dBA pour déterminer la richesse en basses fréquences du bruit (différence L_A-L_C aussi appelée indice harmonique).

Les pondérations B et D sont très peu utilisées.

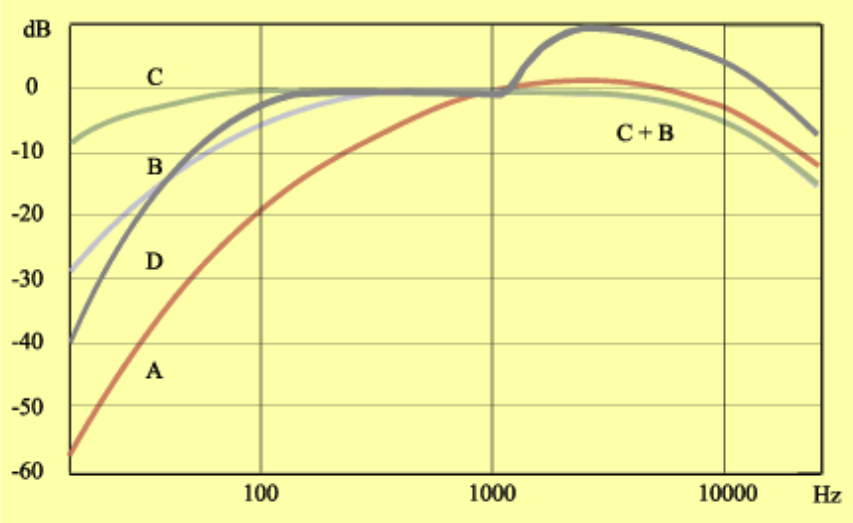


Figure 3 : courbes de pondération A, B, C et D (source : http://www.inrp.fr)

Une courbe de pondération fréquentielle désignée par G (définie par la norme ISO 7196 de 1995) a été développée pour la mesure des fréquences comprises entre 1 et 20 Hz pour lesquelles la pondération A n'est plus adaptée (voir Figure 4).

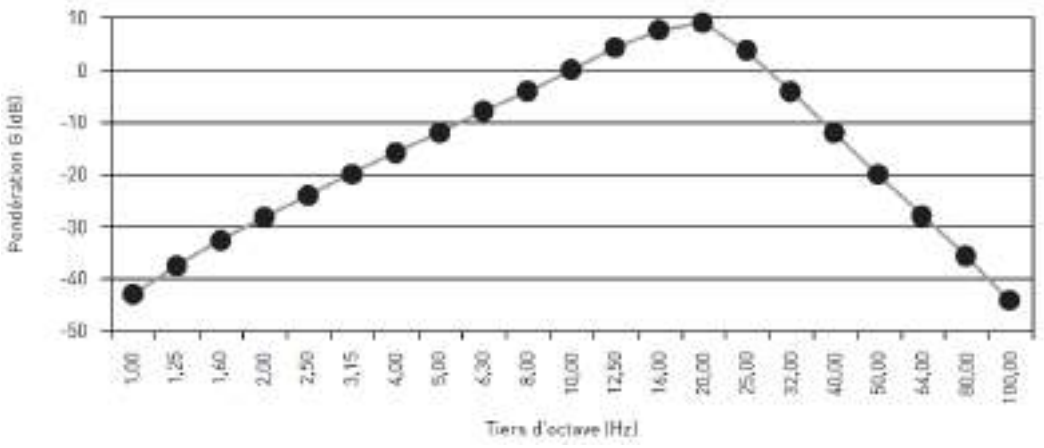


Figure 4 : courbe de pondération G (source : (Chatillon 2006))

2.2 Éoliennes et bruits basses fréquences et infrasons

2.2.1 Description et fonctionnement d'une éolienne

Les aérogénérateurs modernes, appelés couramment éoliennes, sont constitués d'un mât de 50 à 125 m de haut au sommet duquel se trouve une nacelle renfermant toute la partie mécanique reliée à un rotor. Les éoliennes implantées actuellement en Europe comportent généralement trois pales fixées sur un axe horizontal, en amont de la nacelle et de la tour (voir Figure 5). D'autres modèles à deux pales existent, avec un rotor en aval de la nacelle, et certaines sont à axes verticaux. Ces derniers modèles sont rares et ne sont pas étudiées dans ce rapport.

Actionnées par le vent, les pales en rotation balayent un cercle de 40 à 120 mètres de diamètre, 6 à 25 fois par minute. Fixées sur le moyeu, les pales entraînent une génératrice électrique qui peut être installée dans la nacelle.

De l'éolienne, le courant électrique est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison. Puis, l'électricité est élevée à la tension supérieure au niveau du poste source et injectée sur le réseau national, pour ce qui concerne les éoliennes reliées au réseau.

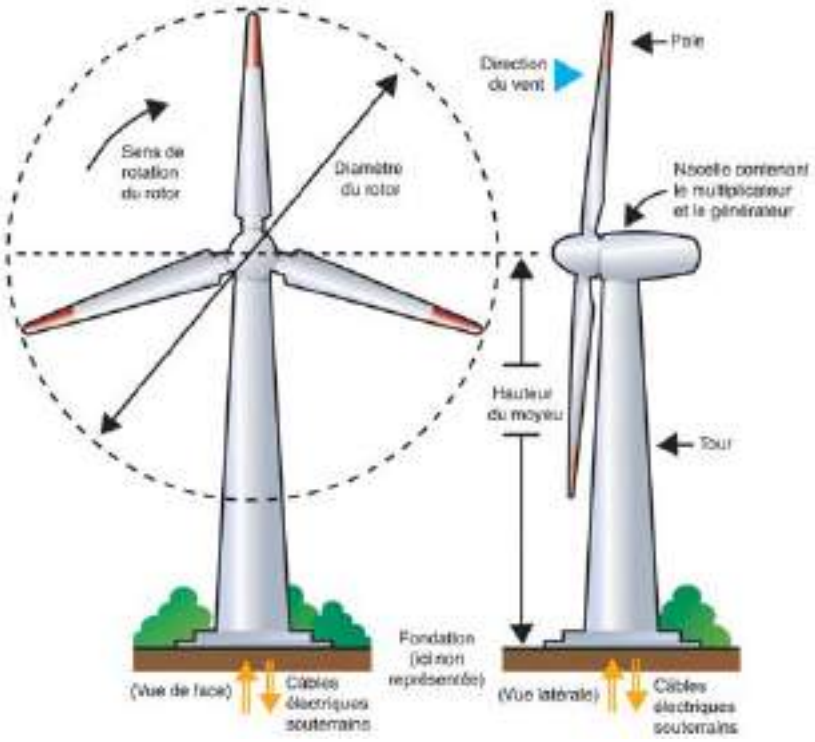


Figure 5 : éléments d'une éolienne

La puissance instantanée d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent. Suivant les modèles, une éolienne fonctionne à partir d'une vitesse de vent de 3 m/s et atteint sa puissance nominale pour un vent d'environ 14 m/s au niveau de la nacelle. Au-delà, il faut limiter la vitesse du rotor et arrêter automatiquement l'éolienne quand la vitesse du vent est trop élevée, à 25 m/s (90 km/h).

2.2.2 Émissions sonores des éoliennes

Le bruit émis par les éoliennes est habituellement décrit comme un bruit large bande, ayant des similitudes avec un bruit rose (bruit dont l'énergie est uniforme pour chaque bande d'octave). Cela signifie que ce bruit est composé d'une large gamme de fréquences sonores, riche en basses fréquences et dont l'intensité en dB diminue avec la fréquence. Il peut comporter des

caractéristiques tonales : on peut déceler l'existence de raies fines associées à la fréquence fondamentale (et ses harmoniques) de passage des pales au niveau du mât et de raies provenant de bruits d'origine mécanique de la nacelle (boite de vitesse, *etc*.). À proximité d'une éolienne, ces caractéristiques constituent une signature spectrale spécifique du bruit éolien (voir Figure 6).

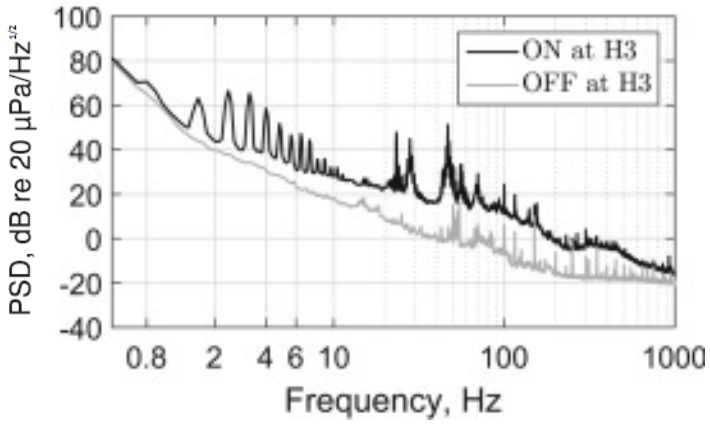


Figure 6 : exemple de résultat de mesures du bruit autour dun parc éolien (extérieur) pour des conditions de fonctionnement et d'arrêt des turbines. Source : (Zajamšek *et al.* 2016)

2.2.3 Mesures de bruit éolien et difficultés métrologiques

Les mesures des bruits basses fréquences et des infrasons pour les éoliennes sont particulièrement complexes et nécessitent le recours à une instrumentation particulière ainsi qu'à des scientifiques expérimentés pour la mettre en œuvre.

▶ Des pratiques en cours de normalisation

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de procédure normalisée pour la mesure des infrasons et des bruits très basses fréquences et pour la mesure des bruits audibles des éoliennes. Concernant la mesure des infrasons et des bruits très basses fréquences, une norme a été publiée en 2016 (PR NF S31-135), une autre s'appliquant au bruit audible des éoliennes est actuellement en cours de rédaction.

De manière classique, les pratiques concernant les mesures de bruit s'effectuent suivant différents paramètres de premier ordre tels que :

- la pondération fréquentielle (voir chapitre 2.1.4) ;
- les durées de mesures effectives et les périodes de temps de référence sur lesquelles elles sont moyennées ;
- les périodes d'enregistrement ;
- l'indice acoustique pour en exprimer les résultats ;
- l'emplacement des points de mesure.

▶ Des émissions sonores qui fluctuent

La nature de la source (éoliennes) apporte une problématique supplémentaire : les émissions sonores des éoliennes ne sont pas constantes et fluctuent dans le temps en fonction notamment des conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, turbulence, *etc*.). La Figure 7 illustre cette fluctuation des niveaux sonores pour des enregistrements effectués auprès d'éoliennes en

Australie (SouthAustralia-EPA 2013), sur une journée entière après élimination des bruits autres qu'éoliens.

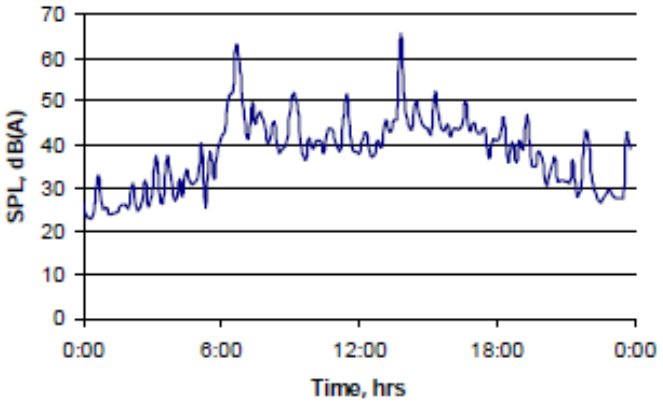


Figure 7 : variation temporelle du bruit d'éoliennes ($L_{Aeq\ 10min}$) (source : (SouthAustralia-EPA 2013))

En l'absence de norme, les mesures du bruit audible des éoliennes sont effectuées de manière usuelle sur des durées de 1 s, moyennées ensuite sur des périodes de 10 min et exprimées à l'aide d'un indice L50[17]. Ces résultats sont ensuite rapportés par classe de vent (vitesse et directivité). La durée d'une campagne de mesures est donc fonction de la complétude des enregistrements pour chacun de ces régimes de vent.

Ce mode de fonctionnement se justifie par le besoin de déterminer le bruit supplémentaire associé aux éoliennes par rapport au bruit résiduel (notion d'émergence), sachant que celui-ci fluctue également avec le temps. Or, dans la pratique, ces mesures (bruit éolien et bruit de fond) ne sont pas simultanées mais décalées dans le temps. La période moyenne de 10 minutes constitue un compromis entre la variabilité du bruit de fond, la dynamique de réponse des machines aux consignes (durée de l'adaptation des éoliennes aux régimes de vents) et la dynamique du vent (vents considérés stables sur des périodes de 10 minutes). Combinée avec l'utilisation d'un indice statistique L50, cette configuration permet alors d'éliminer statistiquement les fluctuations rapides de bruit associées aux évènements peu répétables et donc d'établir des niveaux d'émergence normalement représentatifs de l'éolienne.

- **Un bruit de fond instrumental élevé aux basses fréquences**

Le bruit de fond dû à la chaîne de mesurage s'avère particulièrement élevé pour les très basses fréquences et infrasons. Le niveau sonore minimal pouvant être mesuré dépend de ce bruit de fond, les divers facteurs instrumentaux intervenants (bruit de fond instrumental du microphone, bruit de fond lié à l'électronique, configurations utilisées, *etc*.) pouvant déplacer ce niveau minimum jusqu'à 30 dB (voir Figure 8).

[17] Niveau sonore dépassé 50 % du temps sur une période de temps donné / médiane des niveaux sonores mesurés sur une période de temps donné.

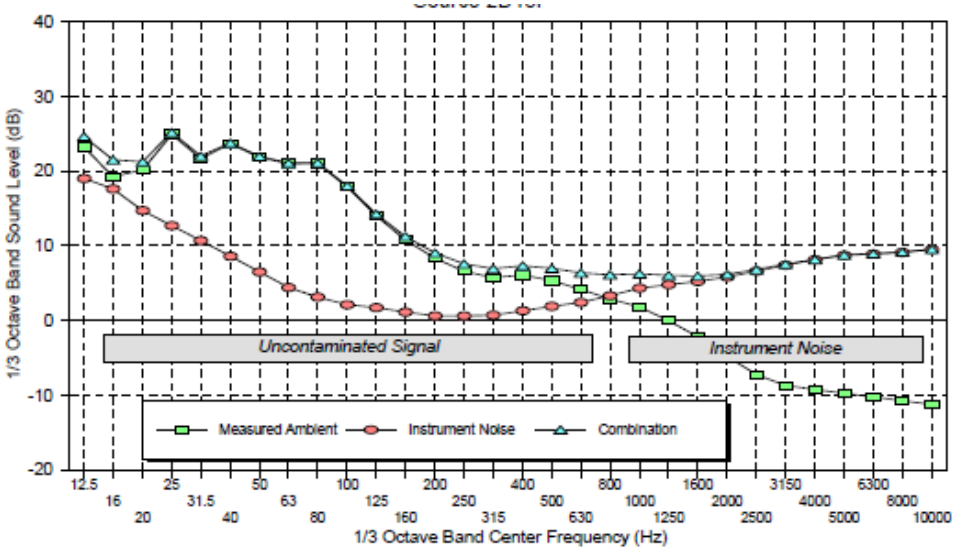


Figure 8 : exemple de bruit mesuré en extérieur et du spectre de bruit de l'instrument (source : (Horonjeff et Ross 2002))

De fait, une composante non négligeable du niveau sonore mesuré aux basses fréquences peut être directement attribuable à ce bruit de fond dû à l'appareillage, à laquelle s'ajoute le bruit de fond environnemental (associé aux autres sources sonores présentes). La détermination de la contribution sonore du bruit éolien peut donc s'avérer délicate pour ces fréquences.

- **Des niveaux sonores mesurés avec un filtre linéaire qui dépendent des spécificités de l'appareillage utilisé**

Le niveau sonore mesuré dépend directement de la gamme de fréquences de fonctionnement du microphone utilisé, les meilleurs microphones pour l'enregistrement ayant des gammes de fréquences débutant à un peu moins de 1 Hz et allant jusqu'à 16 Hz. La composante basse fréquence des éoliennes étant *a priori* importante sur l'ensemble du spectre non filtré, le choix du microphone (*via* la gamme de fréquence qu'il permet d'étudier) influencera donc directement le niveau sonore mesuré. Le choix de la chaîne de mesurage (dont les microphones) utilisée doit être effectué en fonction du niveau sonore et des fréquences recherchées.

- **Des limites spécifiquement liées à la métrologie des basses fréquences et infrasons appliquée aux éoliennes**

Le positionnement des points de mesures revêt également une grande influence sur ces mesures et peut s'avérer problématique dans le cas des basses fréquences. Le champ sonore proche d'une source (champ proche) est moins homogène spatialement qu'à grande distance de cette même source (champ lointain). Un point de mesure est considéré en champ lointain lorsque les critères suivants sont remplis :

- la distance à la source est au moins 3 fois supérieure à la longueur d'onde mesurée ;
- la distance à la source est au moins 3 fois supérieure à la plus grande dimension de la source.

Dans le cas de basses fréquences la limite champ proche / champ lointain est ainsi d'autant plus grande que la fréquence est basse (exemple : 100 m pour la fréquence de 10 Hz). Les éoliennes sont généralement considérées comme des sources sonores soit ponctuelles, soit surfaciques (bord d'attaque de pale + nacelle voir chapitre 4.2.1). La littérature existante reste imprécise quant à la dimension exacte à considérer pour la source (hauteur du mât ou dimension de la pale, voire

du rotor) afin de déterminer ce seuil de distance permettant de distinguer ces conditions en champ proche ou lointain.

- **Un étalonnage compliqué pour le mesurage des basses fréquences**

Les dispositifs d'étalonnage de chaine de mesurage en basses fréquences sont très peu nombreux actuellement. De plus, aucun des dispositifs existants n'est relié à un laboratoire d'étalonnage primaire comme cela est le cas pour les étalons acoustiques dans le domaine des fréquences audibles. Ce rôle est assuré en France par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Ceci implique donc, soit d'effectuer un étalonnage avec un étalon raccordé, mais à une fréquence en dehors de la gamme des infrasons et basses fréquences (IBF), soit de réaliser un étalonnage à une fréquence dans le domaine des IBF mais avec un dispositif non raccordé. Il n'y a donc pas à l'heure actuelle de solutions totalement satisfaisantes d'un point de vue métrologique concernant l'étalonnage pour la gamme de fréquences IBF.

- **De possibles effets pour les mesures de basses fréquences en intérieur**

Enfin, les mesures effectuées à l'intérieur d'un habitat comportent de nouvelles complexités liées aux résonnances pouvant possiblement intervenir en milieu clos, notamment pour les basses fréquences (longueurs d'ondes de dimensions proches de celles de la pièce, voir Figure 9). En conséquence, les résultats aux basses fréquences peuvent fortement varier en fonction de la localisation du point de mesure dans la pièce (voir Figure 10).

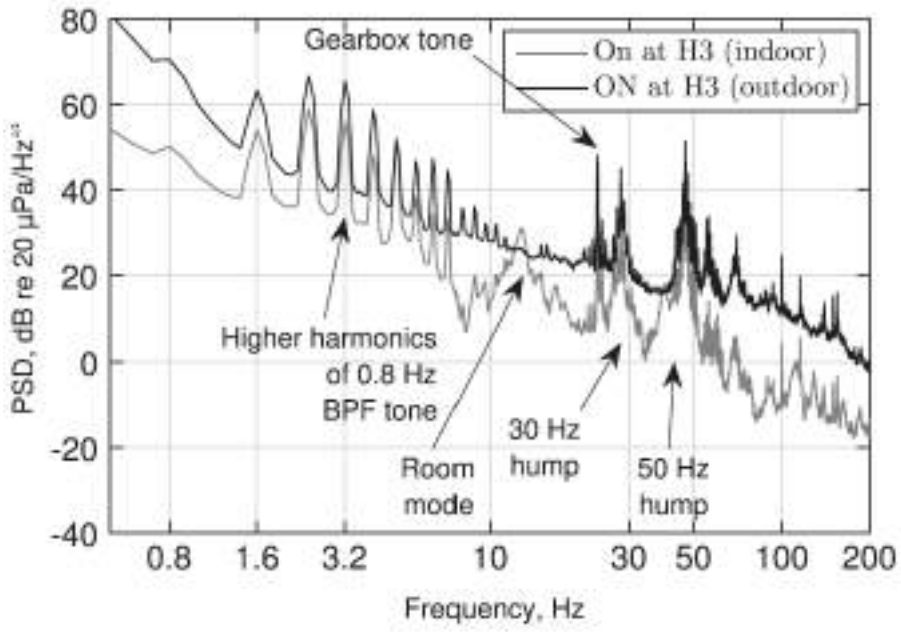


Figure 9 : comparaison des spectres enregistrés en façade et en intérieur d'un bâtiment et identification du mode de résonnance en intérieur lié à la géométrie de la pièce (« *room mode* ») (source : (Zajamšek *et al.* 2016))

En complément, l'ouverture d'une fenêtre peut transformer la pièce en résonateur de Helmholtz[18], auquel cas les résultats de mesures seront encore différents.

[18] La résonance de Helmholtz est un phénomène de résonance de l'air dans une cavité. Un exemple de cet effet est le bruit résonant créé lorsque l'on souffle sur le goulot d'une bouteille vide.

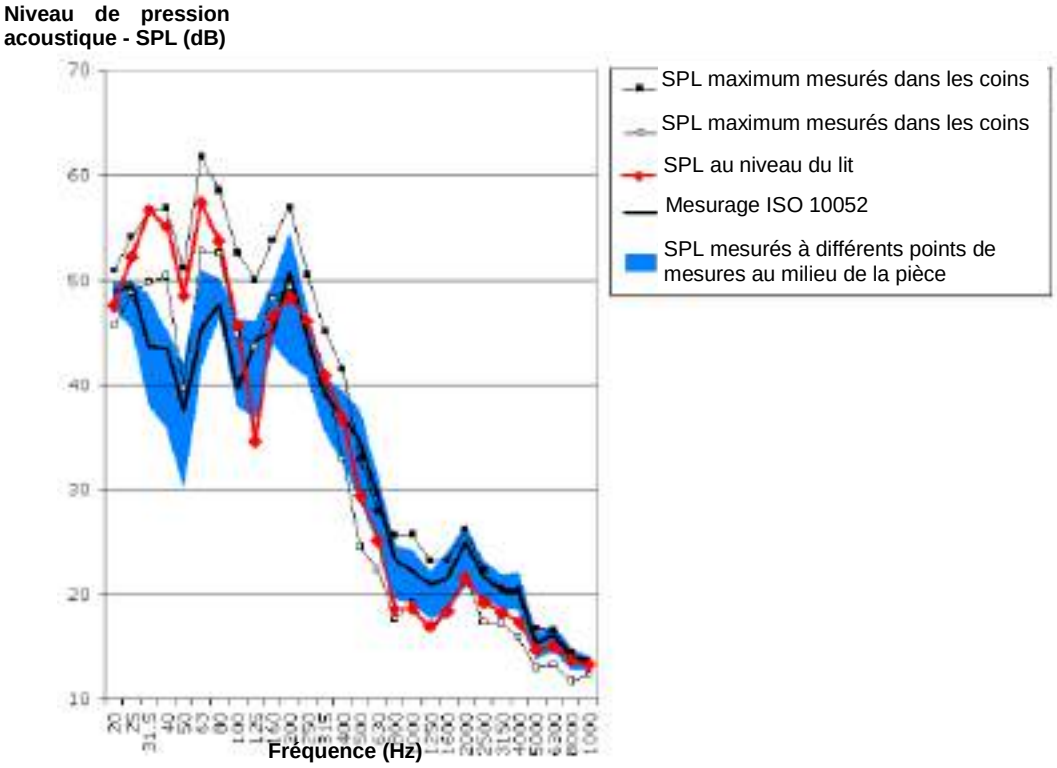


Figure 10 : variation de mesures du niveau sonore en fonction du point de mesure et des fréquences (source : (Oliva *et al.* 2011))

2.3 Description et perspectives du parc éolien français

2.3.1 La place de l'électricité éolienne dans le secteur énergétique français

Le développement de l'énergie éolienne en France est mû par l'impératif mondial de transition énergétique pour limiter le changement climatique et l'épuisement des ressources d'énergie fossile. La Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte vise à porter la part des énergies renouvelables à près d'un tiers de la consommation énergétique finale en 2030. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- baisser la part du nucléaire à 50 % à horizon 2025 ;
- réduire de 40 % les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2030 ;
- réduire la consommation des énergies fossiles de 30 % en 2030 ;
- porter la part des énergies renouvelables à 40 % de la production d'électricité en 2030.

La génération d'électricité en France reste majoritairement d'origine nucléaire. En dépit de la variabilité interannuelle[19], la couverture de la consommation par la production issue de l'ensemble des sources d'énergies renouvelables est stable depuis 3 ans (19 % environ, voir Tableau 2).

[19] Les chiffres du Tableau 2 reflètent en partie la variabilité climatique. L'hiver doux de 2014 avait modéré par rapport à 2015 la demande adressée aux centrales thermiques à flamme utilisant les combustibles fossiles. La pluviométrie influence la production hydraulique de +15 % à -30 % autour de la moyenne. En 2015, l'augmentation de la production renouvelable hors hydraulique (+20,8 %) ne compense que partiellement la baisse de la production hydraulique liée à la plus faible pluviométrie alors que la consommation d'électricité est en hausse.

Tableau 2 : l'éolien parmi les sources de production d'électricité en France fin 2015 (RTE 2016)

	Puissance installée		Évolution 2014/2015	Énergie produite		Variation 2015/2014
Nucléaire	63 130 MW	48,8 %	+ 0 MW	416,8 TWh	76,3 %	+ 0,2 %
Combustibles fossiles	22 553 MW	17,4 %	- 1 414 MW	34,1 TWh	6,2 %	+ 31,9 %
Hydraulique	25 421 MW	19,7 %	- 1 MW	58,7 TWh	10,8 %	- 13,7 %
Éolien	10 312 MW	8,0 %	+ 999 MW	21,1 TWh	3,9 %	+ 23,3 %
Solaire	6 191 MW	4,8 %	+ 985 MW	7,4 TWh	1,4 %	+ 25,1 %
Bioénergies	1 703 MW	1,3 %	+ 105 MW	7,9 TWh	1,4 %	+ 4,9 %
Total	129 310 MW	100 %	+ 585 MW	546,0 TWh	100 %	+ 1,1 %

La puissance installée n'est pas directement comparable à la puissance produite au cours d'une année. Ainsi, comme le montre le Tableau 2, l'éolien constitue 8,0 % de la puissance installée en France mais ne représente que 3,9 % de la production en 2015, du fait du facteur de charge dû à l'intermittence du vent.

2.3.2 La place du parc éolien français dans le monde

Dans le monde, la capacité de production d'électricité éolienne installée était estimée à 432 GW fin 2015 (dont 63 GW nouvellement installés en 2015, soit environ 15 % en un an). Dans l'Union européenne, le parc éolien a franchi le seuil des 140 GW installés fin 2015 (EurObserv'ER 2016).

En matière de capacité de production, le parc éolien français se hisse au 8ème rang mondial et au 3ème européen[20] avec une puissance d'environ 10 300 MW en 2015[21](EurObserv'ER 2016), soit environ 6 100 éoliennes réparties en 926 parcs.

Néanmoins, avec 155 W par habitant de puissance éolienne installée (Figure 12), la France se situe en dessous de la moyenne européenne, loin derrière l'Allemagne et l'Espagne (respectivement 554 et 496 W/hab), en rang comparable à celui du Royaume Uni et de l'Italie. La disponibilité de l'énergie nucléaire et hydraulique ainsi que les contraintes géographiques et démographiques du territoire contribuent à expliquer cette situation.

[20] 4ème (derrière la Grande-Bretagne) d'après le baromètre éolien réalisé par observ'ER et 3ème d'après le « panorama de l'électricité renouvelable au 30 juin 2015 »

http://www.rte-france.com/sites/default/files/2015_06_30_rte_panorama_elr_juin2015.pdf

[21] Départements et territoires d'Outre-mer non inclus ; 9 769 MW en 2015 d'après le panorama de l'électricité renouvelable au 30 juin 2015

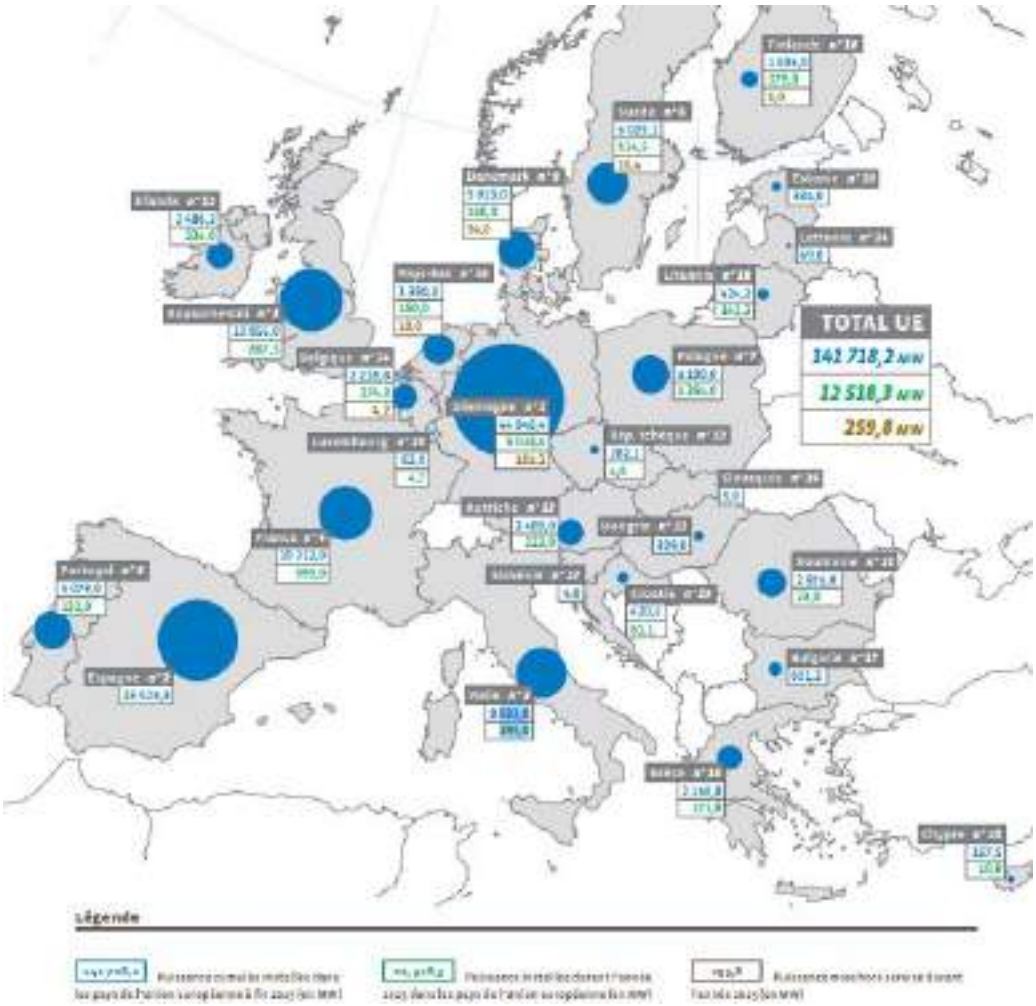
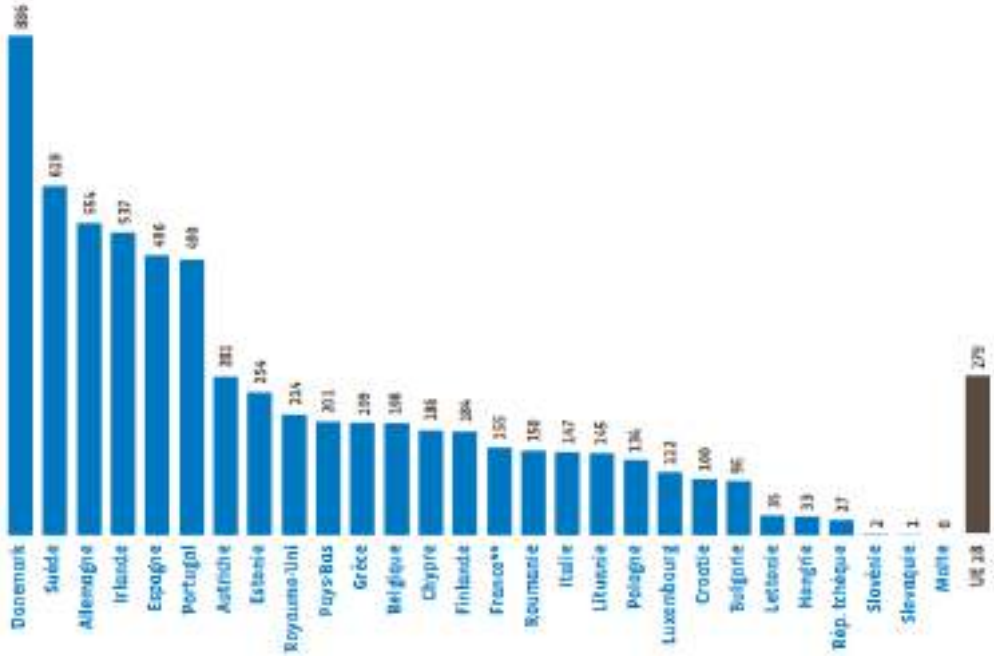


Figure 11 : puissance éolienne dans l'Union européenne fin 2015 (EurObserv'ER 2016)



**Départements d'outre mer non inclus pour la France

Figure 12 : puissance éolienne pour 1 000 habitants dans les pays de l'Union européenne en 2015 (kW/1 000 hab) (EurObserv'ER 2016)

2.3.3 Un parc éolien très hétérogène

L'analyse du parc éolien français[22] dévoile la grande diversité des situations existantes, aussi bien en matière de technologie utilisée (puissances, dimensions et marques des éoliennes) qu'en matière de caractéristiques de parc éolien (nombre de machines par parc et année de mise en service).

Cette analyse s'est limitée aux seuls parcs métropolitains car les éoliennes déployées dans les collectivités d'Outre mer présentent des caractéristiques très différentes (dimensions et puissances unitaires faibles). Il est à souligner que si aucun parc éolien en mer (ou *offshore*) n'était installé au moment de cette analyse, de nombreux projets de ce type de parcs sont néanmoins en cours d'instruction administrative, voire d'installation.

En juin 2014, la France métropolitaine comprenait 685 parcs éoliens regroupant au total 4 386 éoliennes La grande majorité d'entre eux sont constitués de 4 à 6 machines (voir Figure 13). Le nombre maximum d'éoliennes pour un seul parc est de 39. Il est à noter que plusieurs parcs différents peuvent coexister dans des zones géographiques proches.

Figure 13 : répartition des parcs éoliens en France métropolitaine en fonction du nombre d'éoliennes (source : the windpower.net, site consulté en juin 2014)

L'analyse des technologies éoliennes installées montre une prépondérance de machines de puissance unitaire de 2 MW (plus de 40 % des éoliennes, voir Figure 14) de diverses

[22] Analyse effectuée en juin 2014 à partir de la base de données http://www.thewindpower.net. Les données proposées pour chaque parc éolien sont les suivantes :

- Code postal ;
- Puissance totale (MW) ;
- Nombre total de machines (éoliennes) ;
- Puissance unitaire ;
- Hauteur des nacelles ;
- Diamètre des pales ;
- Marque des machines (éoliennes) ;
- Année de mise en service ;
- Nom du parc ;
- Commune(s) ;
- Développeur ;
- Exploitant ;
- Propriétaire.

dimensions[23]. On observe que les parcs les plus récents intègrent les éoliennes les plus puissantes (3 MW) et de plus grandes dimensions (jusqu'à 112 m pour les parcs éoliens terrestres). Sur l'ensemble des éoliennes déjà installées en 2014, plus des trois quarts sont de puissance unitaire de 2 MW et plus.

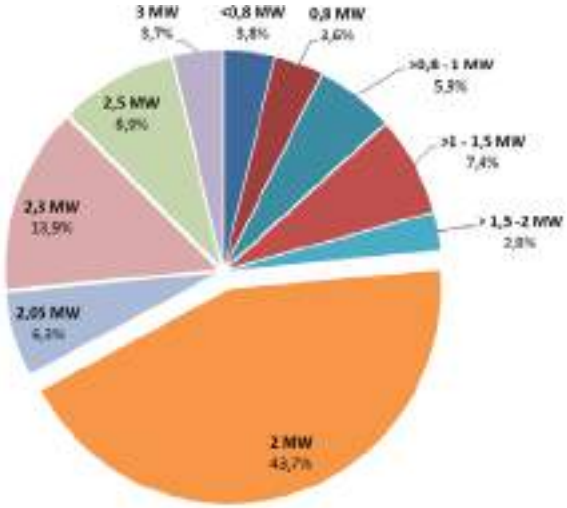


Figure 14 : répartition des puissances unitaires des éoliennes en France métropolitaine (source : the windpower.net, consulté en juin 2014)

Comme l'indique la Figure 15, ces turbines sont principalement issues de cinq marques de constructeurs étrangers : Enercon (Allemagne), Gamesa (Espagne), Nordex (Allemagne), Senvion[24] (Allemagne) et Vestas (Danemark). Il est néanmoins à noter que les mâts sont le plus souvent produits localement.

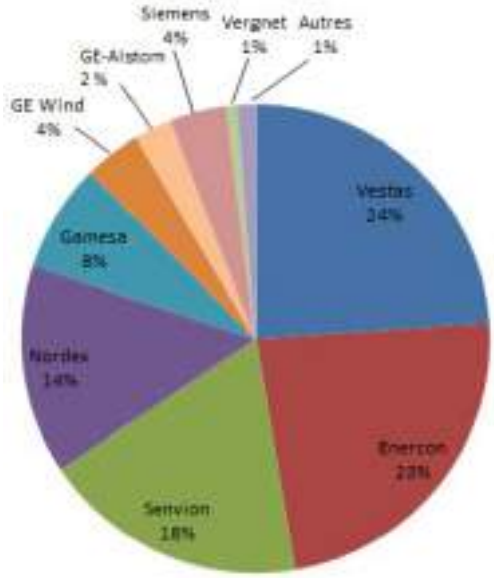


Figure 15 : répartition du parc éolien par marques d'éoliennes installées en France métropolitaine (31 décembre 2015) (source : base de données FÉE)

La répartition géographique des éoliennes (voir Figure 16) se révèle également hétérogène puisque cinq régions (Champagne-Ardenne, Picardie, Centre, Bretagne et Lorraine) totalisent

[23] La hauteur des nacelles dépend des caractéristiques topographiques, les diamètres des pales pour ces éoliennes de puissance unitaire de 2 MW sont majoritairement de 90-92 m (plus de 50 %) et de 80-82 m (près de 40 %).

[24] Anciennement REpower.

58 % de la puissance du parc raccordé en France métropolitaine, d'après le panorama de l'électricité renouvelable au 30 juin 2015[25].

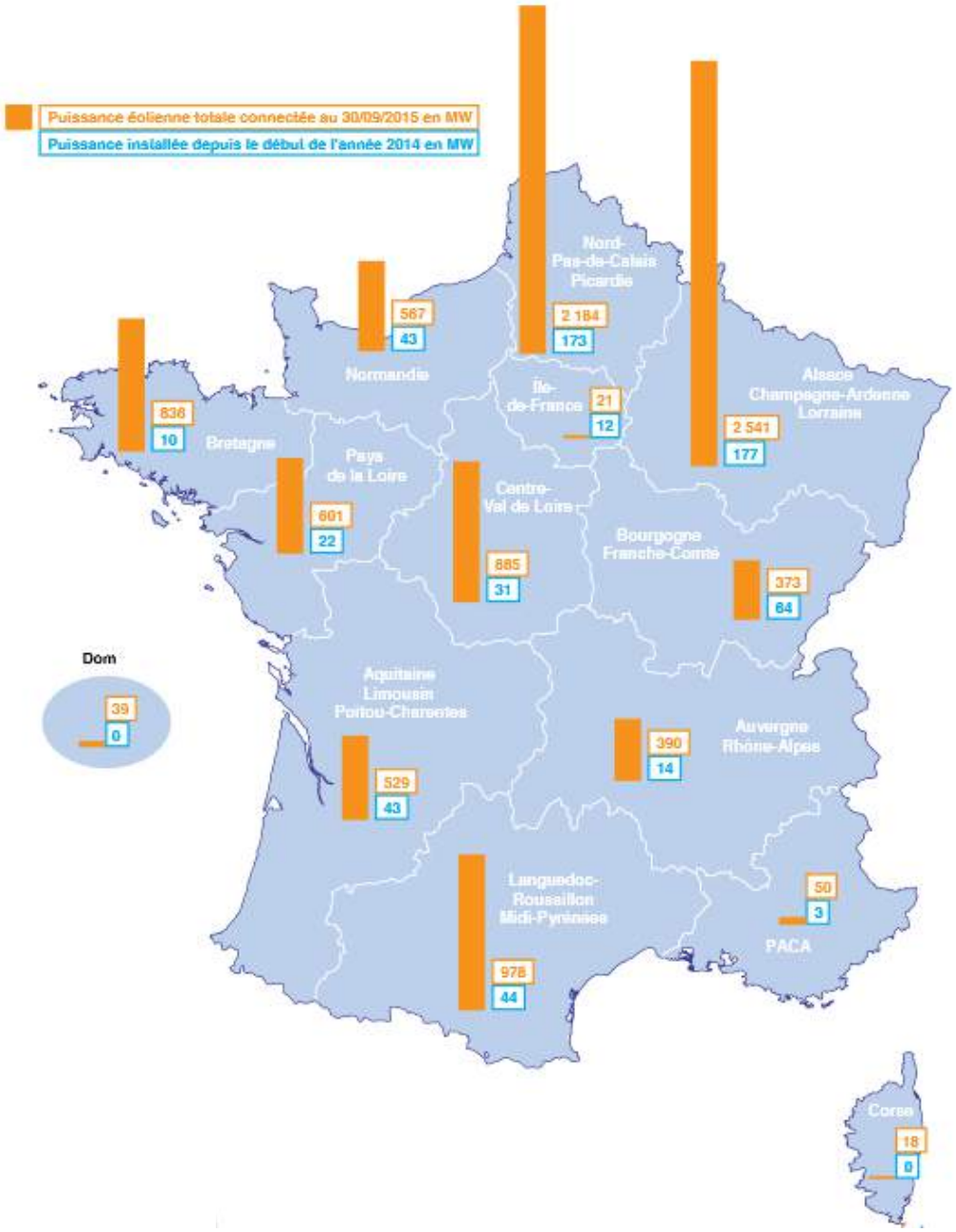


Figure 16 : puissance éolienne en France (fin septembre 2015). Source : (Observ'ER 2015)

La grande diversité des caractéristiques des parcs éoliens en France (dimension, marque et année de mise en marche, puissance, nombre de machines par parc, *etc*.) répond à la disparité des contextes géographiques locaux (topographie, caractéristiques de vent, densité de population, *etc*.). Cette grande hétérogénéité de situations empêche une représentation simple et unique d'un parc éolien moyen et esquisse à l'inverse une image multiforme complexe à cerner dans son ensemble.

[25] http://www.rte-france.com/sites/default/files/2015_06_30_rte_panorama_elr_juin2015.pdf

2.3.4 Perspectives de l'éolien en France

▶ Objectifs et dynamique du parc français

La France, *via* le Grenelle de l'environnement, s'était fixée en 2009 le double objectif de disposer d'un parc éolien terrestre d'une puissance de 19 GW et d'un parc éolien maritime de 6 GW en 2020. Ces objectifs ont été récemment révisés par Arrêté[26] en avril 2016 et prévoient pour l'éolien terrestre un premier objectif de puissance installée de 15 000 MW en 2018 et deux options (haute et basse) pour 2023 (respectivement 21 800 et 26 000 MW). Les objectifs pour l'éolien en mer ont également été revus : 500 MW en 2018 et 3 000 MW en 2023.

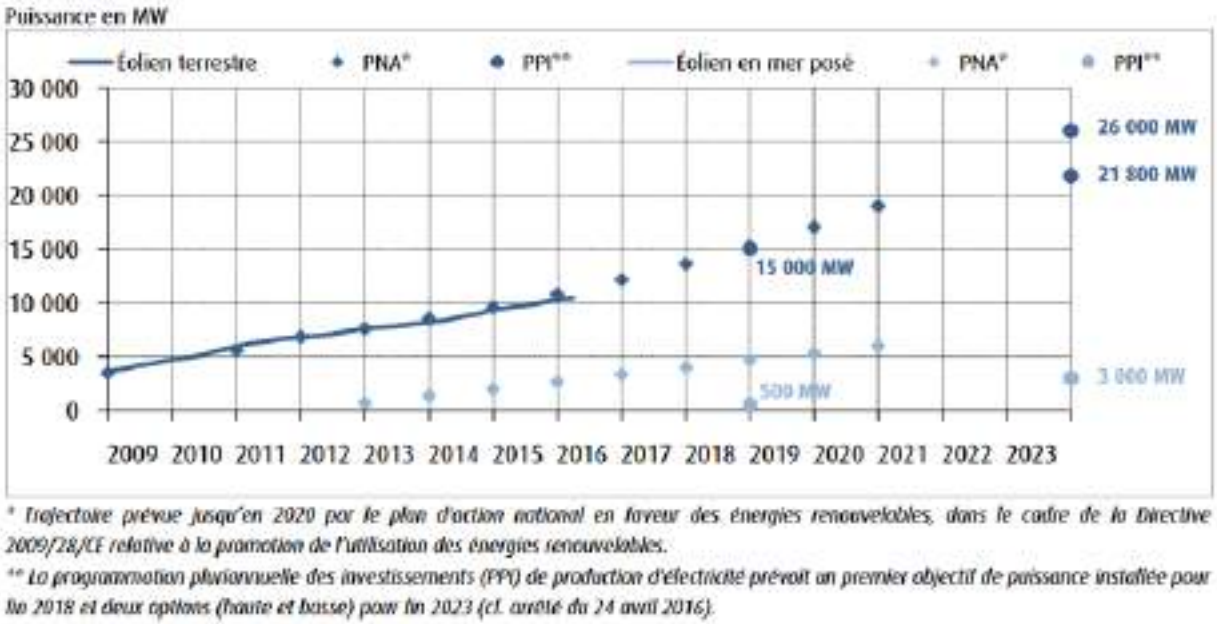


Figure 17 : évolution du parc éolien en France et objectifs nationaux (source : tableau de bord éolien du Ministère du développement durable - premier trimestre 2016)

La Figure 18 montre un rebond de la croissance de la filière éolienne en 2014 qui, après plusieurs années d'essoufflement, ne revient pas encore aux niveaux de 2009-2010. Ces chiffres confirment la reprise amorcée en 2014 (1 114 MW raccordés au cours de l'année en France) qui a fait suite à la publication le 1er juillet 2014 d'un nouvel arrêté tarifaire (voir §2.4.2) notifié à la Commission européenne. Ce regain d'activité s'explique également par diverses mesures de simplification administrative : suppression des zones de développement éolien (*ZDE)* et de la règle dite des « 5 mâts », expérimentation d'une autorisation unique[27] (voir §2.4.2).

[26] Arrêté du 24 avril 2016 relatif aux objectifs de développement des énergies renouvelables

[27] L'expérimentation d'une autorisation unique en matière d'installations classées a été mise en œuvre par un décret du 2 mai 2014. Elle permet de regrouper dans un arrêté préfectoral unique, l'autorisation ICPE elle-même, l'autorisation de défrichement et la dérogation à l'interdiction de destruction d'espèces protégées, auxquelles s'ajoutent, pour les parcs éoliens, le permis de construire et l'autorisation au titre du code de l'énergie.La loi Macron l'a étendue à tous les projets éoliens et de méthanisation depuis le 1er novembre 2015

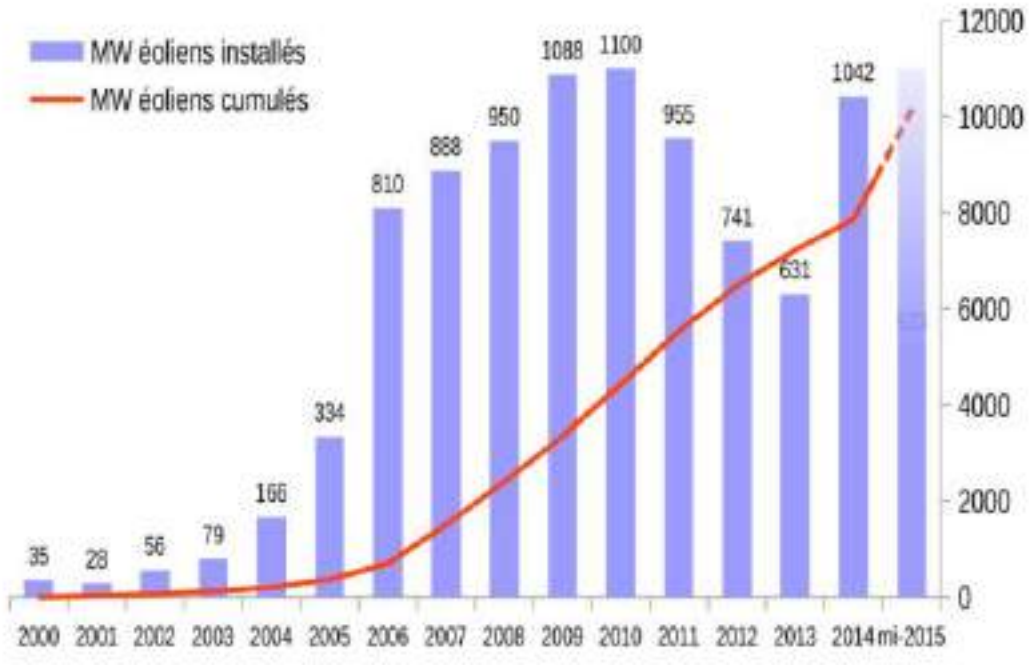


Figure 18 : évolution de la puissance totale du parc éolien en France métropolitaine (courbe rouge) et de la puissance annuelle raccordée (barres bleues). Source : (FEE-BearingPoint 2015)

Avec un parc éolien terrestre atteignant une puissance installée de 10 460 MW fin mars, l'atteinte du premier objectif fixé pour 2018 nécessiterait donc une augmentation de 50 % de la puissance installée d'ici 2 ans. La puissance des éoliennes augmente régulièrement : celles mises en service aujourd'hui disposent d'une puissance unitaire de 2 à 3 MW, contre 1 MW en moyenne au début des années 2000. Ainsi, aux quelques 6 000 éoliennes déjà installées devront s'ajouter environ 2 000 éoliennes supplémentaires pour atteindre les 15 GW prévus Le remplacement d'éoliennes par des modèles de générations plus récentes pourrait constituer un levier d'action complémentaire.

- **Dynamique territoriale de l'éolien en France**

Le parc éolien français et son évolution peuvent également être décris sous l'angle territorial. Ainsi, l'association Vent de Colère a par exemple estimé par calcul[28] la superficie du territoire situé à moins de 1 ou 1,5 km d'une éolienne ainsi que la population présente dans cet espace rural (voir Tableau 3). Selon ses estimations, environ 1,4 % du territoire métropolitain se situerait fin 2015 à moins d'1 km d'une éolienne, l'atteinte des objectifs initialement fixés pour 2020 augmenterait cette part à 2 %, la population présente sur ces territoires passant de 262 500 à 393 750 personnes.

Suivant le récent scénario de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), publié en octobre 2015, qui examine l'hypothèse d'une énergie 100 % renouvelable en France en

[28] Les hypothèses de ce calcul sont les suivantes :

- Les parcs éoliens regroupent 6 machines réparties sur une ligne de 2 km. La superficie considérée pour un parc est alors :
  - 7,5 km² pour une distance de 1 km (forme oblongue de 4 km de long sur 2 de large) ;
  - 14 km² pour une distance de 1,5 km (forme oblongue de 5 km delong sur 3 de large) ;
- une densité de population rurale moyenne en France de 35 personnes/km².

2050[29], la part du territoire concerné s'élèverait à près de 7 %, et concernerait plus de 1 300 000 riverains.

Ces estimations de populations ne font référence qu'à une proximité relative à des éoliennes et ne peuvent pas prétendre à caractériser l'exposition sonore des riverains qui dépend de nombreux paramètres (caractéristiques topographiques, distances d'éloignement réglementaires, *etc*.).

Tableau 3 : estimation des territoires et populations en France métropolitaine situés à une distance de moins de 1 km et 1,5 km d'une éolienne (source : association Vent de Colère !)

				Territoire situé à moins d'1 km d'une éolienne			Territoire situé à moins d'1,5 km d'une éolienne		
Scénarios	**P totale (GW)**	**Nb d'éoliennes**	**Nb de sites**	**Superficie (km²)**	**% du territoire**	**Population présente estimée**	**Superficie (km²)**	**% du territoire**	**Population présente estimée**
Fin 2015	10	5 500	1 000	7 500	1,4 %	262 500	14 000	2,5 %	490 000
Objectifs 2020	19	8 000	1 500	11 250	2,0 %	393 750	21 000	3,8 %	735 000
Scénario Ademe 2050	100	40 000	5 000	37 500	6,8 %	1 312 500	70 000	12,7 %	2 450 000

Comme le montre ce tableau, la distance aux éoliennes, fixée arbitrairement comme référence, conditionne très fortement les résultats au niveau territorial : ces quantifications n'ont pas la même signification selon la distance choisie et n'intègrent pas les questions de diversité des situations (topographies locales, caractéristiques des parcs, *etc*.).

Plusieurs distances pourraient être considérées suivant différents arguments : la distance d'éloignement réglementaire actuelle (500 m) ou celle discutée par le Sénat au début de l'année 2015 (1 000 m), la distance minimum souhaitée par les associations de riverains ou encore des distances relatives à la visibilité des éoliennes (10 à 15 km[30]).

2.4 Contexte socioéconomique autour de l'implantation des parcs éoliens en France

Dans le cadre d'une convention de recherche et développement, l'Anses a demandé au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement[31] (Cired) de synthétiser les éléments de contexte socio-économique et les controverses existantes liés aux éoliennes. Ce chapitre a principalement été rédigé sur la base du document remis par le Cired. Il a été complété par le groupe de travail en s'aidant notamment des éléments d'information recueillis au cours des auditions des parties prenantes.

[29] http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations

[30] http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/eoliennes_et_saturation_visuelle-2_cle512187.pdf

[31] Unité Mixte de Recherche (UMR 8568) sous tutelle principale du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et de l'École des ponts ParisTech, avec l'École des hautes études en sciences sociales, AgroParisTech-ENGREF et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

2.4.1 Contexte et enjeux du développement de l'énergie éolienne en France

▶ Les particularités de l'énergie éolienne dans le contexte du secteur de l'énergie

Comme indiqué au début du chapitre précédent (§ 2.3), le processus de transition énergétique constitue l'élément moteur du développement de l'énergie éolienne en France.

La sélection des technologies de production d'électricité sur un territoire donné, appelée aussi « bouquet énergétique » (voir Tableau 2), peut se décrire au premier abord par une tension entre libéralisation et régulation.

La libéralisation vise à ouvrir les marchés pour bénéficier de la concurrence sur les prix et de la flexibilité du secteur privé. L'énergie éolienne se distingue en deux points à cet égard :

- premièrement, une mise en place « rapide » : une fois les dossiers administratifs d'autorisation validés, l'installation d'un parc est une question de trimestres (la construction d'une centrale thermique de taille standard est une question d'années, pour le nucléaire, les délais peuvent être encore plus longs) ;
- secondement, les opérateurs sont variés : les caractéristiques de la technologie éolienne autorisent l'existence de producteurs indépendants de l'opérateur historique. Elle bénéficie du contexte de dérégulation du secteur de l'énergie dans l'Union européenne. Les forces de marché, ainsi que la baisse de la demande, ont aujourd'hui conduit l'Europe en situation de surcapacité de production.

L'intervention de l'État est inévitable dans le secteur de l'énergie pour plusieurs raisons : assurer l'équilibre du réseau requiert un acteur central fort, et historiquement l'efficacité technique a justifié des moyens de production de grande taille. Cela a conduit dans beaucoup de pays à l'existence d'un monopole dont l'activité doit être orientée pour profiter à la société dans son ensemble.

L'éolien et les autres énergies renouvelables remettent en cause cette logique. Leur développement s'inscrit dans une mutation du système technique vers un « réseau intelligent », caractérisé par une production plus décentralisée, un stockage de l'énergie et une demande qui répond plus activement. La mutation du réseau et le développement des énergies renouvelables n'ont pas le même rythme et les limites du réseau peuvent parfois bloquer le développement des énergies renouvelables intermittentes[32].

La régulation est aussi justifiée par les aspects non marchands de la production d'énergie, en particulier l'environnement, la sécurité nationale et l'économie :

- concernant l'environnement, le développement de l'éolien diminue les pollutions locales, transfrontalières, globales et intergénérationnelles créées par les combustibles fossiles et les déchets du nucléaire ;
- concernant la sécurité nationale, l'énergie éolienne ne contribue pas à la prolifération des armes atomiques, et atténue les problématiques géopolitiques internationales pour sécuriser l'accès aux ressources fossiles ;
- concernant l'économie enfin, l'éolien est un marché porteur. Les états ont le souci de protéger la compétitivité nationale et de développer leur industrie domestique. Même si le

[32] La variabilité de la production éolienne à des échelles de temps de quelques heures à quelques jours pose des problèmes techniques pour assurer en permanence l'équilibre entre l'offre et la demande. Ces problèmes sont particulièrement difficiles pour les petits réseaux des îles (Outre mer et Corse) qui ne sont pas reliés au continent : les Zones non interconnectées (ZNI). Afin d'assurer la sécurité de l'alimentation électrique des réseaux insulaires, l'arrêté ministériel du 23 avril 2008 a fixé le seuil maximal d'énergies intermittentes à 30 % de la puissance appelée sur le réseau. La Commission de régulation de l'énergie (CRE) a toutefois récemment recommandé que cet arrêté soit mis à jour afin d'autoriser la documentation technique de référence du gestionnaire de réseaux à définir de nouveaux seuils supérieurs à 30 %, en fonction des caractéristiques du stockage dont dispose l'installation.

contexte général est à l'intégration européenne et au libre-échange, l'enjeu de protection des industries naissantes ne saurait être occulté.

Le système d'échange de quotas d'émission de CO_2 de l'Union européenne a été conçu pour forcer les acteurs à considérer ces aspects non marchands dans leurs décisions. Il devrait permettre de favoriser la production d'électricité sans carbone, donc l'éolien. En pratique, ce système est moins incitatif qu'espéré, la valeur de marché du CO_2 restant durablement inférieure à dix euros la tonne[33]. L'intervention de l'État passe donc surtout par d'autres moyens : des appels d'offre pour l'éolien *offshore*, un tarif de rachat pour l'éolien terrestre (voir § 2.4.2).

▶ Le contexte socio-économique de l'éolien en France

Le baromètre 2015 des énergies renouvelables électriques en France de l'Ademe (Observ'ER 2015) estimait le chiffre d'affaire de la filière en France à 2 620 millions d'euros en 2014 pour un secteur représentant 12 520 emplois directs fin 2014 (FEE-BearingPoint 2015). La répartition de ces emplois en 2014 en fonction des quatre sous-secteurs de la filière éolienne est présentée dans le Tableau 4.

Tableau 4 : répartition des emplois de la filière éolienne française fin 2014 (source : (FEE-BearingPoint 2015))

	Études et développement	Fabrication de composants	Ingénierie de construction	Exploitation et maintenance
Emplois	3 020	3 520	3 560	2 420

L'analyse de l'évolution des emplois de l'éolien entre 2008 et 2014 (données Ademe de 2008 à 2012, données FEE Bearing point pour les années 2013 et 2014, voir Figure 19) montre que le récent rebond constaté pour l'éolien (voir Figure 18) s'est accompagné à partir de 2013 d'une légère augmentation des emplois du secteur.

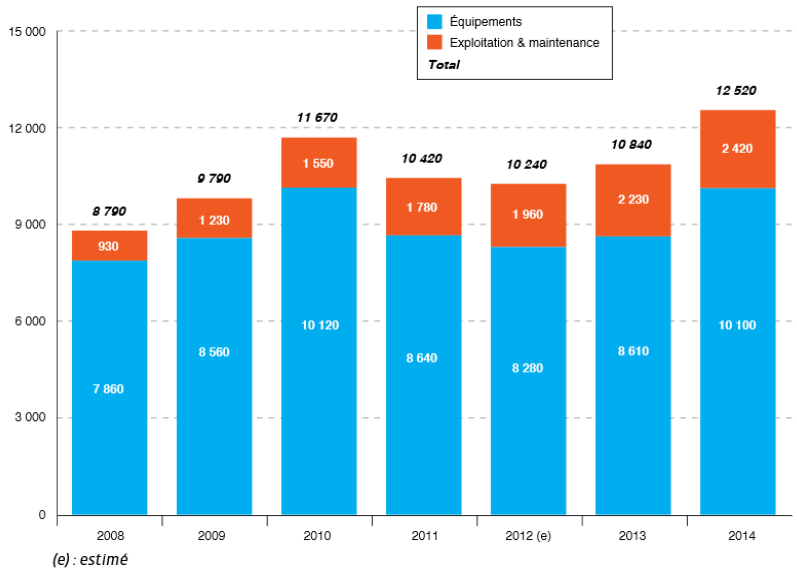


Figure 19 : évolution du nombre d'emplois directs (en équivalent temps plein) dans le secteur de l'éolien en France. Source : (Observ'ER 2015).

La majorité des éoliennes installées en France proviennent de constructeurs étrangers. La France ne compte pas d'industriel national majeur dans la fabrication d'aérogénérateurs : la société

[33] voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-prix-du-carbone.html

Vergnet s'est associée au chinois Sinovel pour distribuer les éoliennes de grande taille (au dessus de 1,5 MW) en 2015. Les actifs « énergie » de la société Alstom ont été rachetés par General Electric en 2014 et Areva Wind produit principalement à Bremerhaven en Allemagne. Cette société s'apprêterait néanmoins à développer une base industrielle en France, pour les parcs *offshore*.

La France compte cependant plusieurs leaders internationaux sur le marché des énergies renouvelables, dont l'éolien. En effet, les trois autres maillons de la filière (entreprises d'étude et de développement, ingénierie et construction, exploitation et maintenance) sont moins délocalisables et présents en France.

2.4.2 Appuis économiques et administratifs au développement de l'éolien en France

De 1995 à 2000, le développement éolien procédait par appels d'offres. Depuis 2000, le cœur du dispositif incitatif est une obligation d'achat[34] : EdF et, si les installations de production sont raccordées aux réseaux publics de distribution dans leur zone de desserte, les entreprises locales de distribution, doivent acheter l'électricité produite à partir de l'énergie éolienne aux exploitants qui en font la demande, à un tarif d'achat fixé par arrêté. Le tarif d'achat garantit un niveau de revenu au producteur pendant une durée donnée. Dans les conditions de 2008, pour l'éolien terrestre, les contrats étaient souscrits pour 15 ans, le tarif avait été fixé à 0,082 €/kWh pendant 10 ans, puis entre 0,028 et 0,082 €/kWh pendant 5 ans selon les sites. Ce tarif a été actualisé chaque année en fonction d'un indice des coûts horaires du travail et d'un indice des prix à la production. Le surcoût occasionné était compensé et répercuté sur les clients finaux par une contribution proportionnelle à l'électricité qu'ils consomment, la contribution au service public de l'électricité (CSPE). Des textes réglementaires qui vont modifier ces conditions devraient être publiés prochainement.

La reprise d'activité du secteur éolien constatée en 2014, outre un contexte économique moins déprimé, résulte de la révision en 2013 des dispositions mises en place par l'État pour développer la filière éolienne. Les producteurs d'énergie éolienne terrestre peuvent désormais bénéficier de l'obligation d'achat sans condition d'implantation, ni limite de puissance. La règle des cinq mats, qui imposait à tout nouveau parc d'être composé d'au moins cinq éoliennes, est supprimée, de même que les zones de développement de l'éolien (ZDE).

De plus, la procédure administrative d'autorisation a été simplifiée par la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (art. 145) qui instaure un régime d'autorisation unique pour les parcs éoliens terrestres (cf. § 3.1.1). L'autorisation est délivrée (ou non) par le Préfet de département.

Le développement de l'éolien *offshore* au large des côtes françaises est stimulé par des appels d'offres. Il s'agit de réaliser un petit nombre de grands parcs et de développer une industrie de

34 L'article L. 314-1 du code de l'énergie fixe les dispositions dans lesquelles les installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables peuvent bénéficier de l'obligation d'achat.

Le Décret n°2001-410 du 10 mai 2001 relatif aux conditions d'achat de l'électricité produite par des producteurs bénéficiant de l'obligation d'achat précise les conditions d'attribution des tarifs d'achat.

La loi n°2103-312 du 15 avril 2013 visant à préparer la transition vers un système énergétique sobre apporte plus précisément des dispositions législatives répondant à l'engagement du Gouvernement de simplifier le cadre juridique de l'éolien terrestre, tout en assurant la prise en compte de tous les enjeux environnementaux et paysagers.

Pour l'éolien terrestre, l'arrêté du 17 juin 2014 fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent implantées à terre. Un tarif d'achat spécifique pour les installations éoliennes situées en zones cycloniques a été mis en place en 2013. Les zones en question regroupent la Réunion, la Guadeloupe, la Martinique, Saint Martin et Saint Barthélemy (arrêté du 8 mars 2013).

production d'aérogénérateurs marins sur le territoire national. Même si les éoliennes sont en mer, elles restent visibles des côtes et soulèvent des controverses engageant les riverains et les organisations de pêcheurs. S'agissant de grandes infrastructures, la Commission nationale du débat public (CNDP) organise systématiquement un débat.

2.4.3 Panorama des différentes instances de décision et de discussion de la politique éolienne et de leurs acteurs

L'énergie éolienne est discutée à différents échelons : politique énergie-climat nationale, politique éolienne nationale, politique énergie-climat territoriale, implantation locale de parcs éoliens. Ces débats prennent place dans des arènes distinctes. Les logiques argumentatives et les listes des participants diffèrent selon les échelons. Les niveaux sont cependant articulés entre eux. Par exemple, des échecs répétés d'implantation des parcs peuvent relancer les débats sur la place de l'éolien au niveau national.

- **Politique énergie-climat nationale**

Au niveau de la politique énergie-climat nationale, la Conférence environnementale organisée par le gouvernement réunit un panel de parties prenantes sociales[35] comprenant : ministères, syndicats, entreprises, organisations non gouvernementales (ONG) environnementales, élus locaux, parlementaires et autres. À ce niveau, les débats sont marqués par les clivages politiques, les contingences de la diplomatie européenne et mondiale, et les stratégies macroéconomiques et industrielles. Les médias ne se comptent pas parmi les parties prenantes, même s'ils sont des acteurs influents. Les organisations syndicales sont généralement absentes des débats sur l'éolien.

- **Politique éolienne nationale**

Les débats sur la politique nationale éolienne réunissent un panel d'acteurs plus spécialisés. Les ministères sont appuyés par l'Ademe et d'autres agences. Les grandes entreprises comme Total, Areva, EdF ou Engie participent directement, même si l'énergie éolienne n'est qu'une de leurs activités, et que leur domaine d'action dépasse la France et l'Europe. Les entreprises interviennent aussi à travers des regroupements comme France énergie éolienne (FEE), Observ'ER, ou encore le Syndicat des énergies renouvelables (SER). On retrouve aussi les ONG environnementales généralistes nationales, par exemple la Fondation Nicolas Hulot, les ONG internationales, ainsi que les fédérations d'ONG, par exemple le Réseau action climat qui regroupe les Amis de la Terre (*Friends of Earth*), Greenpeace, le Ligue de protection des oiseaux (LPO), le WWF. D'autres associations plus spécialisées comme le Comité de liaison énergies renouvelables (CLER) par exemple participent aux débats à ce niveau.

- **Politique énergie-climat territoriale**

Au niveau de la politique énergie-climat territoriale, les acteurs sont les élus locaux, le Préfet et les services de l'État comme les directions régionales de l'environnement (Dreal) ou les services régionaux de l'Ademe et les associations nationales. Les citoyens peuvent être impliqués, plutôt sous la forme de la consultation pour avis. L'administration locale et l'administration nationale représentent toutes deux un intérêt public mais des publics différents : leurs intérêts ne sont pas toujours convergents. Les orientations politiques et les échéances électorales jouent un rôle.

35 Table ronde n°1 : Préparer le débat national sur la transition énergétique. 13 septembre 2012 (mis à jour le 17 septembre 2012) - Conférence Environnementale.

- **Processus locaux de mise en place de parcs éoliens**

En ce qui concerne les débats autour de l'implantation des parcs éoliens, on retrouve des acteurs des niveaux précédents : le Préfet et les services de l'État, les associations nationales, les élus locaux et des ONG. Le conseil municipal est, théoriquement, le premier lieu des débats. D'autres catégories d'acteurs interviennent, comme le porteur du projet et les riverains représentés par des associations spécifiques.

Le porteur du projet, en France, est souvent une entreprise privée. À ce titre il pourrait souffrir d'un déficit de crédibilité *a priori* auprès du public (Jobert, Laborgne, et Mimler 2007). Les citoyens perçoivent que les intérêts de l'entreprise divergent des leurs.

Les élus locaux représentent les riverains. Leurs intérêts peuvent diverger de celui de la préfecture. Ils ont plus de poids à ce niveau qu'au niveau de la politique territoriale générale. Les considérations électorales pèsent toujours sur le débat, par exemple en imposant les calendriers.

Face à l'annonce d'un projet, les habitants opposants se constituent souvent en association (type loi de 1901). Ces associations adhèrent à des fédérations nationales comme la Fédération environnement durable (FED) ou Vent de colère, qui regroupent des centaines d'associations. Parmi les riverains, il convient de distinguer les catégories suivantes :

- les riverains bénéficiant directement de l'installation (propriétaires fonciers, *etc*.) ;
- les habitants proches qui supporteraient des nuisances ou risques directs sans avoir de bénéfices directs ;
- et les habitants éloignés qui ne supportent pas de bénéfice ni de nuisance directe, mais peuvent apprécier les bénéfices environnementaux d'une électricité « propre ».

Le modèle de l'instruction publique préalable est instancié par les procédures de permis de construire, d'étude d'impact, d'enquête publique et de justice administrative (voir § 3.1.1). Dans le contexte de la transition énergétique pour la croissance verte, de nouveaux dispositifs avaient été mis au point, renversant le modèle et permettant une concertation préalable : les zones de développement éolien (ZDE) (désormais supprimées), le plan territorial climat air énergie (PCAET), et le schéma régional climat air énergie (SRCAE) comprenant le schéma régional (SRE).

L'enquête publique reste néanmoins le principal lieu d'expression des populations locales. Trop tardive et centrée sur un projet isolé, elle ne permet pas d'appréhender les enjeux de recomposition des paysages suscités par l'éolien à l'échelle d'un territoire. La capacité à porter la concertation revient à des outils de planification comme les PCET, SRCAE qui comprend le SRE. La pratique de ces nouveaux outils reste à maîtriser, en particulier pour gérer l'empilement des niveaux de planification commune / intercommunalité / département / région.

2.4.4 Analyses des problématiques liées aux projets de parcs éoliens

Ce paragraphe décrit les dynamiques associatives locales autour des éoliennes, les controverses ainsi que les facteurs identifiés d'adhésion et d'oppositions aux projets de parcs éoliens.

2.4.4.1 Description des dynamiques associatives locales autour des éoliennes

Aujourd'hui, les dynamiques de contestation sociale des projets de parc éolien sont fréquentes. Ces contestations s'inscrivent dans un contexte général de reconnaissance croissante du droit à la participation citoyenne dans les décisions. Elle est illustrée par les conférences Grenelle de l'environnement I et II, et la Conférence environnementale.

- **Une adaptation progressive des outils administratifs aux particularités de l'éolien**

L'arrivée des éoliennes a initialement mis l'autorité publique en difficulté face à de nouveaux enjeux : échelle paysagère, élévation inédite des machines supérieure à 100 m, co-visibilité[36] au-delà de 10 km. De plus, le grand nombre de projets et la spécificité de l'expertise requise ont parfois posé des problèmes d'effectifs pour suivre les projets sur le terrain. Démunis à la fin des années 90, les services de l'État ont disposé en 2003 des premiers outils d'instruction pour le permis de construire et l'étude d'impact.

À l'origine, le permis de construire suit une logique de « paysage monumental ». Il protège les abords immédiats de points d'intérêt monumentaux ayant une existence réglementaire. Or, l'éolien produit des co-visibilités lointaines qui échappent à la pertinence de ce mode de protection. En réponse, l'administration s'est prononcée pour un élargissement des zonages de protection autour des monuments et sites à protéger, voire une sortie de la logique de zonage et protection des monuments, pour verser sur une argumentation paysagère sur la base du code rural.

Le modèle d'autorisation des parcs éoliens reste celui de l'instruction administrative préalable à l'implication des citoyens. Les porteurs de projet demandent d'abord à l'administration le permis de construire, en déposant une étude d'impact, et l'enquête publique arrive en fin de processus. L'étude d'impact porte notamment sur le niveau de bruit supplémentaire causé par les machines. L'éloignement minimum aux habitations reste un paramètre clé des dossiers (l'ensemble de la règlementation et des procédures relatives à la mise en place d'un parc éolien sont détaillées dans le § 3.1.1).

- **Un cadre réglementaire dont la mise en pratique, peu propice à la concertation, réduit *de facto* les riverains à des adhérents ou opposants au projet**

Dans la logique d'instruction publique préalable, la consultation légale des citoyens arrive en fin de parcours. D'un point de vue réglementaire, l'enquête publique constitue le seul dispositif de concertation associé à la procédure d'instruction des projets éoliens. Il intervient tardivement, alors que le projet, d'un point de vue technique et financier, est déjà abouti. Par ailleurs, le rôle des enquêtes publiques dans l'instruction des projets paraît souvent marginal. Ce constat soulève nombre d'interrogations sur le fonctionnement des enquêtes publiques, lieu principal d'expression des populations locales. Certes, leur faible fréquentation pourrait expliquer l'influence modeste des riverains sur les projets éoliens. Mais cela n'explique pas pourquoi, dans les cas où l'affluence est importante, les populations peinent à rediscuter l'opportunité et les modalités de mise en œuvre des projets éoliens.

Dans les faits, de nombreux biais diminuent le rôle de ce dispositif de consultation : l'expression publique, sans la garantie du secret des opinions personnelles, reste un acte difficile lorsqu'un projet divise une population locale ; la consultation publique, parce qu'elle intervient tardivement, positionne les citoyens en situation de réaction plutôt que de proposition. Certains commissaires enquêteurs présentent l'éolien comme d'intérêt général au titre de la lutte contre l'effet de serre et des engagements de la France dans le protocole de Kyoto, ce qui peut diminuer la légitimité des opposants. Le cas de l'Aveyron, étudié par Nadaï et Labussière (Nadaï et Labussière 2009), est symptomatique de ces dysfonctionnements : alors que les associations anti-éoliennes se sont multipliées (dix associations d'opposants créées entre 2002 et 2007 en Aveyron), à l'automne 2006 aucune enquête publique n'avait alors débouché sur un avis défavorable (sur 10 observations).

Outre l'enquête publique, les populations opposées à un parc éolien disposent de deux autres moyens d'actions, qui durcissent considérablement leur position et les éloignent d'une réouverture

[36] La notion de co-visibilité (désigne deux éléments (bâtiment, élément de paysage) mis en relation par un même regard (l'un étant visible à partir de l'autre, ou les deux pouvant être embrassés par un même regard).

du contenu du projet. Tout d'abord, elles peuvent saisir le Préfet, qui est l'autorité décidant de l'attribution du permis de construire, par un recours gracieux en annulation ou modification du projet. Si le Préfet ne donne pas de suite, il ne leur reste d'autre solution que d'attaquer sa décision devant le tribunal administratif. En raison de cette judiciarisation progressive, il est difficile aux opposants de s'inscrire dans une stratégie de protestation constructive. Par ailleurs, les recours administratifs fondés sur des éléments paysagers ou patrimoniaux non-réglementaires, thème central dans le développement des parcs éoliens, s'avèrent juridiquement faibles. Ce paysage « non opposable » constitue une grande partie du territoire et de nos cadres de vie. Sa moindre valeur institutionnelle conduit généralement l'administration à le mettre en première ligne des prospections des développeurs éoliens. L'opposition locale n'a donc, en matière de protection des paysages quotidiens, qu'une marge de manœuvre très réduite – un paradoxe lorsqu'on sait l'adoption par la France de la Convention européenne du paysage, favorable aux paysages ordinaires.

Face aux insatisfactions de la logique d'instruction publique préalable, les développeurs éoliens et les élus locaux organisent généralement des réunions publiques au-delà du conseil municipal, en amont de l'enquête publique. Plusieurs réunions peuvent ainsi ponctuer la phase de projet dans le but d'obtenir l'appui de la population.

Toutefois, tant que ces réunions conservent le principe de la séparation experts / profanes, elles ont un caractère plus informatif que consultatif. Cela n'évite pas des tensions importantes lorsque la population locale découvre des options décidées mais non discutées.

- **De fortes attentes vis-à-vis des services spécialisés de l'État, perçus comme absents de ces réunions publiques**

Une autre faiblesse de ces réunions publiques tient en l'absence des services de l'État alors que ceux-ci pourraient jouer un rôle régulateur en matière d'affichage des règles de planification et de diffusion de l'information concernant le développement éolien sur un territoire. La raison de cette mise en retrait tient en partie à des règles de conduite propres à la fonction d'agent de l'État. Par exemple, la Dreal se définit avant tout comme un service technique spécialisé à la fois autonome, dans l'édiction de ses avis, et dépendante du pouvoir de décision du Préfet quant à leur validation. Dans la pratique, les services de l'État ont pour mission d'aider celui-ci dans ses décisions, en formulant des avis qui ne soient pas problématiques politiquement et s'assurant que la décision finale soit légalement robuste. Il existe donc une séparation nette entre l'exercice technique et politique, laquelle est encore plus manifeste dans l'absence de rapport des Dreal avec les élus locaux et les associations. Cette imperméabilité vis-à-vis de la politique locale tient notamment à la crainte des services de l'état d'être instrumentalisés dans le cadre de réunions publiques, où les débats risquent d'être polémiques, pour au final se retrancher derrière un devoir de réserve. De fait, dans la pratique, les rencontres entre la Dreal et les associations ou les élus locaux relèvent du régime de l'exception. Quelques fois les commissaires enquêteurs consultent les services de l'État au cours de l'enquête publique, mais c'est bien là une des rares interactions avec le processus politique local. C'est au Préfet qu'incombe la tâche de décider de rencontrer les élus et les partenaires de la société civile.

En l'absence de réponse institutionnelle appropriée, en apprendre plus sur les projets constitue pour beaucoup un motif d'adhésion à des collectifs de type associatif, qui apparaissent comme une source d'information existante, indépendante et fiable. Ces collectifs sont portés par leurs membres les plus actifs qui souvent adoptent des positions plus radicales que celles de l'adhérent moyen. Les riverains ne sont pas nécessairement d'emblée opposés à l'éolien. Mais rejoindre ces collectifs peut être une étape clé dans une trajectoire individuelle qui conduit un individu à se construire une posture d'opposition.

2.4.4.2 Controverses et problématiques soulevées par l'implantation de parcs éoliens

- **L'explication d'une opposition *via* un comportement de type NIMBY (*Not In My Back Yard*) n'est pas suffisante**

Selon Aitken (Aitken 2010), beaucoup de recherches en sciences sociales autour de l'implantation des parcs éoliens sont biaisées car les auteurs ont une finalité : favoriser l'acceptabilité sociale des nouvelles pratiques et technologies énergétiques, voir par exemple Jobert *et al*. (Jobert, Laborgne, et Mimler 2007).

Cela peut conduire à une pensée simpliste qui tend à classer les individus en opposants ou adhérents, avec une majorité d'adhérents et une minorité d'opposants qu'il s'agit d'informer mieux ou dont on veut gagner la confiance. Dans ce schéma simpliste, l'opposition est réduite à un comportement NIMBY. Cet acronyme provenant des États-Unis signifie, au sens propre, « *not in my back yard* », « pas chez moi ». Cette attitude se définit comme une conjonction en apparence incohérente : je soutiens une technologie en général mais je m'oppose à l'implantation de cette technologie dans mon voisinage. Le terme désigne de façon péjorative plus large le combat d'associations de riverains créées pour défendre leur environnement local, sans tenir compte de l'intérêt général.

Une littérature abondante a déjà interrogé la notion de NIMBY (Aitken 2010, Peterson, Stephens, et Wilson 2015, Wolsink 2007) en montrant qu'elle ne pouvait, à elle seule, résumer les dynamiques d'opposition ancrées dans le local. Trois points en montrent la limite :

- premièrement, le NIMBY n'est pas la seule forme d'opposition. Selon Wolsink (Wolsink 2000), l'attitude NIMBY apparaît rarement dans les sondages. L'attitude des opposants à un projet peut aussi relever d'un rejet de cette technologie en général (« *Not In Any Backyard* »). Concernant l'éolien, cette attitude peut être motivée par un souci esthétique devant les impacts des machines sur le paysage. On doit toutefois se demander dans quelles mesures les réponses des sondages sont biaisées par un souci d'apparaître cohérent et civique, un NIMBY non assumé ;
- deuxièmement, d'après Nadaï et Labussiere (Nadaï et Labussière 2010), l'idée qu'il y aurait une opposition minoritaire capable à elle seule de bloquer l'éolien est envisageable au Royaume-Uni mais paraît moins fondée en France. Outre Manche, les notables locaux et l'association nationale de protection des paysages ruraux limitent le développement éolien (Toke 2005) au point d'apparaître comme une minorité de blocage (Bell, Gray, et Haggett 2005). La situation française diffère, car les anti-éoliens focalisent l'attention médiatique mais l'examen des procédures de consultation montre qu'ils constituent paradoxalement une force peu écoutée dans l'instruction des projets ;
- troisièmement, invoquer le NIMBY c'est imputer le refus d'autorisation d'implantation au public. C'est une attribution causale qui oublie le rôle de l'administration publique et des porteurs de projet. D'après Nadaï et Labussiere (Nadaï et Labussière 2010), « certains cas étudiés suggèrent que les services de l'État sont à l'origine de la majorité des projets refusés » en France, ce que les auteurs expliquent par le caractère diminué de l'enquête publique déjà discuté au § 2.4.4. Concernant la responsabilité des porteurs de projet, certains tendent à minimiser l'importance et le bien fondé des contestations et conçoivent l'enjeu de l'acceptabilité sociale dans les termes d'un défi pédagogique. Les standards de bonnes pratiques de communication sont parfois difficiles à suivre, mais les porteurs de projet qui les négligent nourrissent leur opposition.

La problématique de l'acceptabilité sociale de l'éolien est complexe, car cette technologie tend à reconfigurer autour d'elle l'espace du débat public en croisant les échelles de réflexion et en redessinant les traditionnels jeux de pouvoirs autour des questions environnementales. Trois points permettent d'en spécifier les enjeux : les écarts entre

- l'acceptabilité d'une technologie générique et territorialisée ;

- le contexte énergétique français dominé par une énergie nucléaire peu émettrice de CO_2 ;
- et la redistribution des oppositions habituelles sur les enjeux environnementaux.

▶ La nécessaire distinction entre technologie générique et technologie territorialisée

Tout d'abord, il faut observer une première distinction entre l'éolien comme technologie générique –l'énergie éolienne– et comme technologie territorialisée –un parc éolien–[37]. La question de l'acceptabilité sociale doit être pensée en fonction de ces deux aspects différents d'existence de la technologie, l'un abstrait et général, l'autre concret et particulier. Ceci éclaire le fait qu'approuvé dans son principe, en tant que politique environnementale nationale ou locale, l'éolien puisse être contesté dans sa phase de projet, au niveau d'une politique du paysage.

C'est notamment ce que montre un sondage BVA[38] / Ademe (BVA/Ademe 2008) : l'acceptabilité sociale de l'éolien en France diminue à mesure que le niveau territorial de son implantation se précise. Favorables à 83 % pour l'installation d'éoliennes sur le territoire national, les français ne sont plus que 62 % favorables dès lors qu'elles sont à côté de chez eux. Mais ces chiffres ne sont le reflet que d'une réalité spéculative, au sens où l'on interroge les individus sur la possibilité de voir s'implanter un parc de 8 à 10 éoliennes à moins d'un kilomètre de chez eux.

Lorsque l'on passe du principe au projet, la question de l'acceptabilité sociale devient encore plus épineuse. L'implantation d'un parc éolien n'interroge pas seulement les individus sur la distance par rapport à leur habitation, mais dans un processus élargi de recomposition des territoires et des paysages.

▶ Des divergences d'objectifs dans le contexte énergétique français

La question de l'acceptabilité sociale est également à replacer dans le contexte énergétique français (voir descriptif au § 2.3). Parmi les opposants, certains s'interrogent sur la nécessité de l'éolien dans le bouquet énergétique français, voire de sa pertinence en matière de bénéfice pour l'environnement, alors que la France possède déjà une énergie nucléaire peu émettrice de CO_2.

Par ailleurs, une partie de l'opinion reste réservée devant cette énergie décentralisée dont le mode de développement apparaît, au niveau local, trop industriel et financier (Labussiere et Nadai 2014, Nadaï et Labussière 2009, Nadaï et van der Horst 2010).

De ce point de vue, le besoin de disposer d'une électricité propre apparaît moins nécessaire que les actions permettant de réduire les émissions de CO_2 grâce à des économies d'énergie dans d'autres secteurs, tels que le bâtiment ou les transports. De son côté, l'État déclare vouloir associer le nucléaire aux énergies renouvelables dans un bouquet énergétique. Le nucléaire constituerait la base électrique – rôle qu'il a joué jusqu'à présent – et les énergies renouvelables, la production nécessaire pour l'absorption des pointes de consommation. Cependant, il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur la question du « bon » bouquet énergétique.

▶ Une recomposition des enjeux politiques

Le troisième point de complexification de l'acceptabilité sociale de l'éolien porte sur la redéfinition du jeu traditionnel des acteurs. Jusqu'ici les controverses se jouaient sur une opposition entre les bénéfices économiques et les coûts environnementaux. Or l'éolien soulève un paradoxe thématisé dans la littérature anglo-saxonne à travers l'expression « *Green on Green* » (Warren *et al.* 2005). Cela signifie que l'éolien produit à la fois des bénéfices globaux environnementaux, comme la

37 On pourrait ajouter un troisième point de vue, celui des firmes. Le marché de l'éolien est aussi une construction sociale, où l'acceptabilité se joue en terme de rentabilité.

38 BVA : institut d'études de marché et d'opinion.

protection du climat, et des impacts locaux qui sont aussi environnementaux, notamment sur les paysages et la biodiversité. Pour cette raison, les groupes environnementaux se retrouvent divisés entre pro- et anti-éolien.

2.4.4.3 Principaux facteurs d'opposition ou d'adhésion aux projets (freins et leviers)

Ellis *et al.* (Ellis 2015, Ellis, Huber, et Horbarty 2013) organisent les principaux facteurs d'opposition aux projets en trois catégories :

a) impacts sur le paysage, l'environnement et le bien être ;
b) équité du processus de décision ;
c) distribution perçue des coûts et des bénéfices.

Huber et Horbaty (Huber et Horbaty 2010) ajoutent un dernier facteur :

d) la stratégie d'implantation du projet.

- **Impacts sur le paysage, l'environnement et le bien être**

Parmi les points les plus fréquents de contestation, on recense d'abord la dégradation visuelle du paysage, ainsi que les impacts sur l'avifaune et sur la flore. Le paysage est une partie essentielle de l'identité d'une communauté locale. Il est nécessaire de le reconnaître pour discuter de l'impact d'un parc éolien, sans occulter la dimension identitaire sous les aspects de santé publique ou d'environnement.

La population attache également une importance symbolique et émotionnelle, bien au-delà des aspects utilitaires, à la vie sauvage. Cela concerne particulièrement les espèces locales, protégées ou rares.

Le bien-être et la qualité de vie peuvent être dégradés par la gêne et le stress liés aux impacts perçus directement, comme par exemple l'éclairage nocturne[39], l'effet stroboscopique, la projection de glace ou le bruit (incluant les composantes basses fréquences et infrasoniques du bruit). Les préoccupations sanitaires liées spécifiquement aux sons basses fréquences et infrasons font l'objet du chapitre suivant (§ 2.5).

- **Équité du processus de décision**

L'équité du processus de décision peut être contestée lorsque la confiance dans le développeur et dans les instances de régulation est faible, et que le processus d'approbation du parc est peu transparent. Les études montrent que les sources d'information auxquelles le public fait généralement plus confiance sont les ONG environnementales et les scientifiques, mais que la crédibilité des élus et de l'administration est généralement peu supérieure à celle des entreprises.

Dans son rapport de 2013, le Service central de prévention de la corruption avait attiré l'attention sur les nombreux cas de prise illégale d'intérêts qui paraissaient accompagner le développement de l'activité éolienne. Le Ministre de l'intérieur, en réponse à une question parlementaire, avait indiqué en novembre 2014[40], que « *Un élu municipal, propriétaire d'un terrain sur lequel il est prévu ou envisagé d'implanter une éolienne, qui participerait à une séance du conseil municipal au cours de laquelle un débat, en dehors de tout vote, aurait lieu sur le projet d'ensemble d'implantation d'éoliennes sur le territoire de la commune, pourrait effectivement être poursuivi pour prise illégale d'intérêts* ».

[39] Arrêté du 13 novembre 2009 relatif à la réalisation du balisage des éoliennes situées en dehors des zones grevées de servitudes aéronautiques.

[40] http://www.justice.gouv.fr/art_pix/rapport_scpc_2014.pdf, p.129.

Distribution perçue des coûts et des bénéfices

La distribution des coûts et des bénéfices peut être facteur d'opposition pour plusieurs raisons. La perception que les bénéfices seront essentiellement reçus par une entreprise étrangère au territoire, alors que les impacts sont ressentis par des populations locales, soulève des problématiques de justice environnementale. Les opposants à l'éolien soulignent aussi que les profits sont privés, mais proviennent en fait de l'argent de la collectivité. En effet, le tarif de rachat –conçu pour être incitatif, c'est à dire favorable aux firmes relativement à leurs autres opportunités d'investissement– pèse sur les consommateurs *via* la contribution au service public de l'électricité.

Au Danemark, les citoyens peuvent détenir jusqu'à 20 % du capital des projets, mais en France la participation citoyenne aux parcs éoliens reste une exception. Le premier parc éolien citoyen en France est celui de Béganne dans le Morbihan (56), qui a ouvert pendant l'été 2014. Celui-ci a été financé par les investissements de plus d'un millier de citoyens pour un capital de plus de deux millions d'euros. Fin 2015, le fond citoyen d'investissement Énergie partagée[41] listait sept autres projets similaires.

La mesure de la dépréciation de l'immobilier causée par la proximité d'un parc éolien reste une question controversée. Certaines études ne trouvent qu'une réduction minimale et un impact sur le tourisme négligeable (Ellis, Huber, et Horbarty 2013, Lang, Opaluch, et Sfinarolakis 2014). D'autres trouvent au contraire que la visibilité des éoliennes réduit significativement la valeur des maisons (Gibbons 2015, Heintzelman et Tuttle 2012). (Gibbons 2015, Heintzelman et Tuttle 2012). Toutefois, même les résultats qui trouvent un effet nul en moyenne sont compatibles avec l'existence d'un certain nombre de cas particuliers où l'effet est très négatif.

La stratégie d'implantation du projet

La stratégie d'implantation (communication auprès des riverains, médiation préalable au projet, bénéfices reversés, *etc*.) mise en œuvre par le porteur du projet constitue également un facteur d'opposition ou d'adhésion. En matière de communication sur les risques, maximiser la quantité d'information n'augmente pas nécessairement le degré d'approbation (Fischhoff 1995). Cela peut conduire les auditeurs à se focaliser sur les risques, créer une incertitude, elle-même mal perçue. Une des originalités des parcs éoliens est d'appeler une discussion sur la dimension esthétique, qui peut impliquer l'utilisation de techniques de visualisation du projet dans le paysage.

Classification des arguments d'opposition et d'adhésion

Les débats appellent de nombreux arguments dont l'énumération exhaustive s'avère peu pertinente dans le cadre de ce rapport. Ellis *et al*. ont effectué un tel travail et ont proposé une classification (Ellis et Barry 2006). Le regroupement des arguments par nature discuté ci-dessus peut se faire en trois niveaux :

- **les facteurs universels :** la performance technologique telle que l'efficacité, la rentabilité des machines ; les options technologiques alternatives ; les questions sociétales posées par le changement climatique ou la sécurité énergétique. Par exemple, le bilan carbone des éoliennes en matière de CO_2 émis par kWh généré sur l'ensemble du cycle de vie, a fait l'objet de controverses. Ce chiffre dépend en effet de paramètres complexes comme le procédé de fabrication, d'installation, d'utilisation, de maintenance, le recyclage, ainsi que des interactions avec le reste du réseau électrique ;
- **les facteurs politiques** : la confiance ou la défiance dans le régulateur, le caractère approprié des politiques ; les compensations et les aides ; la définition et l'identification des zones de développement acceptables ; les attentes des parties prenantes. Dans la

[41] http://energie-partagee.org/.

classification de Jobert *et al.* (Jobert, Laborgne, et Mimler 2007), cette catégorie de facteurs s'intitule « Gestion du projet ». Ces auteurs identifient comme facteurs d'adhésion importants l'intégration locale du développeur, la prise en compte des intérêts des parties prenantes, la transparence, la participation, et en particulier l'ouverture du capital ;

- **les facteurs spécifiques** : la taille ; l'emplacement ; la composition et les attitudes de la communauté locale ; le comportement du porteur de projet ; les impacts cumulés. Jobert *et al*. (Jobert, Laborgne, et Mimler 2007) dénomment cette catégorie de facteurs « Territoriale ». Ils identifient comme facteurs d'adhésion importants une visibilité minimale, la propriété publique du terrain d'implantation, l'histoire d'usage industriel ou militaire du site, et l'intégration dans la stratégie de développement touristique locale.

Chateauraynaud caractérise l'analyse des controverses comme des analyses de balistique argumentative (Chateauraynaud 2011). Dans un débat autour d'une cause, les acteurs produisent des flux d'arguments qu'il est possible d'analyser de façon instrumentée avec la socio-informatique.

2.5 Infrasons et basses fréquences (IBF) : préoccupations pour la santé

Comme précisé au chapitre précédent (§ 2.4.4.3), les préoccupations sanitaires constituent un des motifs d'opposition aux projets éoliens. Néanmoins, il semble que cet aspect sanitaire constitue le principal motif des plaintes remontées par les riverains pour les parcs éoliens en activité. Une partie de ces plaintes concernent spécifiquement les effets des infrasons et des basses fréquences (IBF) qui font l'objet de cette saisine. Ces plaintes font souvent référence aux appellations « syndrome éolien », « maladie vibroacoustique » et aux effets potentiels cochléovestibulaires, termes décrits ci-dessous.

2.5.1 Syndrome éolien ou « *Wind turbine syndrome* » (WTS)

Au-delà de la classique gêne sonore (liée au bruit audible), la littérature, de nature scientifique ou produite par des associations, abonde de descriptions de différents symptômes non spécifiques (maux de tête, perturbations du sommeil, acouphènes, sensations de pression anormale dans les oreilles, *etc*.) reliés par leurs auteurs au bruit éolien (audible et/ou inaudible).

Ces symptômes ont été regroupés sous le terme de « *Wind Turbine Syndrome* » (WTS), ou « syndrome éolien ». Ce terme a été défini pour la première fois par Pierpont en 2009, sous la forme de cas rapportés. L'auteur a réalisé une étude auprès de 10 familles, soit 38 personnes. Les 12 symptômes mentionnés par ces personnes, exposés ci-dessous, constituent selon elle le syndrome éolien (Pierpont 2009) :

- troubles du sommeil ;
- maux de tête ;
- acouphènes (bourdonnement ou tintement dans les oreilles) ;
- sensation d'augmentation de la pression à l'intérieur de l'oreille ;
- vertiges (un terme général incluant vertige, étourdissement, sensations d'évanouissement, *etc*.) ;
- vertige (au sens médical : sensation que son corps tourne ou que la pièce tourne) ;
- nausées ;
- troubles de la vue ;
- tachycardie (battements rapides de cœur) ;
- irritabilité ;

- problèmes de concentration et de mémoire ;
- angoisse associée à des palpitations pendant l'éveil ou le sommeil.

Pierpont avance que ces symptômes ne sont pas psychologiques, mais neurologiques. Le syndrome éolien n'a pas été à ce jour validé comme une pathologie ayant pour origine une atteinte des systèmes sensoriels (voir § 6.3.5.2).

2.5.2 « Maladie vibroacoustique » ou « *Vibroacoustic disease* » (VAD)

Le terme de *vibroacoustic disease* (VAD), littéralement traduit en maladie vibroacoustique, a été utilisé initialement en 1980 par l'équipe de recherche d'Alvez Pereira et Castelo Branco pour décrire les symptômes ressentis par des militaires, des pilotes d'hélicoptères et des techniciens de l'aéronautique exposés à des sons et des vibrations basses fréquences de haute intensité et pour des temps d'exposition longs et répétés.

Les symptômes rapportés par ces personnes incluent des troubles de l'humeur (irritabilité, dépression et agressivité) et des modifications biochimiques extracellulaires (épaississement de la paroi des vaisseaux sanguins) qui seraient responsables, d'après ces auteurs, de pathologies cardiovasculaires et de fibroses pulmonaires ou même de tumeurs pulmonaires.

Cette équipe a ensuite extrapolé les résultats observés chez les militaires et pilotes d'hélicoptères exposés à de fortes intensités à des populations ayant des expositions environnementales bien plus faibles comme celles dues aux éoliennes.

En 2007, ils ont proposé une répartition des symptômes en fonction de la durée d'exposition :

- stade I (2 ans d'exposition) : léger changement d'humeur, troubles de la digestion, nausée, infection buccale et de la gorge, bronchite ;
- stade II, modéré (2 à 10 ans d'exposition) : douleur thoracique changement de l'humeur, fatigue, infections fongiques, virales et parasitaires de la peau, inflammation de la paroi stomacale, mictions douloureuses, présence de sang dans les urines, conjonctivites, allergies ;
- stade III, sévère (> 10 ans d'exposition) : troubles psychiques, hémorragies nasales, digestives et de la conjonctive, varices et hémorroïdes, spasmes coliques, ulcères duodénaux, baisse de l'acuité visuelle, mal de tête, douleurs musculaires importantes, troubles neurologiques.

Les travaux de cette équipe font cependant l'objet de controverses dans la communauté scientifique (voir § 6.4.1).

2.5.3 Effets cochléovestibulaires

L'argument d'absence d'effet dû à la non audibilité des infrasons et basses fréquences sonores provenant des parcs éoliens est remis en cause par certaines associations, sur la base de travaux récents de Salt *et al*. portant sur l'appareil cochléovestibulaire.

Ces travaux portent sur la sensibilité du recepteur aux basses fréquences de l'appareil cochléovestibulaire, et proposant l'existence d'effets physiologiques de signaux non audibles sur certaines cellules sensorielles.

En se basant sur l'hypothèse de Salt, certaines associations de riverains établissent une relation de causalité, qui reste à démontrer, entre sensibilité des cellules ciliées et effets sanitaires (notamment vertiges, nausées et acouphènes). Le fonctionnement de l'appareil cochléovestibulaire et ces effets seront étudiés au chapitre 6.3.2.

2.5.4 Autres effets

D'autres préoccupations dissociées de l'aspect sonore sont également rapportées dans une

moindre mesure : effets stroboscopiques, pollution lumineuse, problématiques de sûreté, etc. Ne faisant pas l'objet de la saisine de l'Anses, ces aspects ne seront pas abordés plus en détail dans ce rapport.

2.5.5 Position des acteurs industriels

Sur la thématique spécifique des infrasons, les organismes représentants du secteur éolien auditionnés au cours de cette expertise (Syndicat des énerges renouvelables - SER et France énergie éolienne - FEE) rapportent de nombreuses questions témoignant d'une appréhension de la part des riverains, en amont de la construction des projets éoliens, dans les phases de conception et de consultation publique. Néanmoins, d'après les exploitants, ces questionnements diminuent voire disparaissent lors de l'exploitation des parcs.

Nombreux sont les acteurs de l'éolien qui jugent insuffisantes les données en faveur de l'existence de conséquences sanitaires liées aux expositions des riverains à des infrasons dont le niveau sonore se situe en dessous du seuil d'audition. Considérant l'impact sanitaire du bruit audible comme plus préoccupant que celui des infrasons, les industriels concentrent leurs efforts sur la recherche de solutions diminuant la pollution sonore dans sa globalité. Ces acteurs se disent néanmoins à l'écoute et soulignent que l'avenir du secteur éolien dépend de la sécurité, des performances économique et énergétique, mais aussi de son acceptabilité. Ils affirment que ces questionnements sont par conséquent pris au sérieux, et que les investissements sont effectués au regard de l'importance du sujet.

Pour ces parties-prenantes, l'augmentation de la distance minimale d'installation des éoliennes aux habitations n'a pas de raison d'être en ce qui concerne les expositions au bruit des éoliennes; seul le respect des seuils d'émergences sonores réglementaires se justifie.

2.5.6 Position des riverains et des associations de riverains

Les associations de riverains (Vent de colère et Fédération environnement durable - FED) et les riverains d'éoliennes consultés ont présenté au groupe de travail de nombreux témoignages rapportant le plus fréquemment de fortes perturbations du sommeil et des acouphènes.

Les premiers effets autorapportés et ressentis sont identifiés comme liés aux éoliennes après une période d'exposition très variable selon les individus, allant de quelques jours à quelques mois. Ces effets semblent le plus souvent réversibles, les personnes disent retrouver un sommeil non perturbé lorsqu'elles s'éloignent de leur domicile. Quelques riverains déclarent cependant une rémanence de ces effets à long terme.

Dans un travail, toujours en cours, de recensement des symptômes auto-déclarés par les riverains de parcs éoliens, la FED a compilé 169 témoignages concernant 511 personnes, qu'elle a présentés au groupe de travail. Parmi les réponses au questionnaire reçues, 36 % font explicitement référence aux infrasons. Néanmoins, les représentants de la FED ont souligné lors de leur audition que les riverains ont rapporté leur ressenti et ne peuvent l'associer précisément au bruit audible, à la partie basses fréquences du signal ou aux infrasons.

Ces parties-prenantes soulignent les particularités de ces expositions sonores : exposition continue au domicile sur des temps longs et pour des zones rurales considérées peu bruyantes. Elles indiquent que l'inaudibilité des infrasons n'équivaut pas à affirmer l'absence d'effet sanitaire. Les associations de riverains justifient la demande d'augmenter la distance minimale d'éloignement notamment en raison d'une plus faible atténuation des infrasons, par rapport aux sons audibles, avec la distance (voir chapitre 4.1.1).

3 État des lieux de la réglementation et de la normalisation

Une revue de la réglementation spécifique a été commandée par l'Anses auprès du Centre d'information et de documentation sur le bruit (CIDB) en vue de nourrir ce chapitre (travaux reçus en février 2014). Le texte présenté ci-dessous en est une synthèse actualisée et complétée par le groupe de travail.

3.1 Réglementation française

3.1.1 Réglementation spécifique aux parcs éoliens

Le 26 août 2011, un changement important est intervenu dans le régime administratif applicable aux projets individuels de parcs éoliens terrestres : jusqu'alors régis par la réglementation sur les bruits de voisinage (activités bruyantes), ceux-ci sont désormais placés sous le régime des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) (Arrêté du 26 août 2011[42]). Les règles applicables à l'instruction des dossiers des installations classées sont applicables aux éoliennes. Le texte distingue deux régimes différents selon la taille et la puissance du parc éolien :

- régime d'autorisation pour les parcs comprenant au moins un aérogénérateur d'une hauteur supérieure à 50 mètres ou comprenant des aérogénérateurs dont le mât est compris entre 12 et 50 mètres mais pour une puissance installée supérieure à 20 MW ;
- régime de déclaration pour les parcs comprenant uniquement des aérogénérateurs d'une hauteur comprise entre 12 et 50 mètres et pour une puissance installée inférieure à 20 MW.

La procédure administrative d'autorisation a été simplifiée par la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (art. 145), qui instaure un régime d'autorisation unique pour les parcs éoliens terrestres. L'autorisation est délivrée (ou non) par le préfet de département. La procédure, généralisée à tout le territoire en 2015, fusionne les multiples autorisations requises, décrites ci-dessous :

- au titre du code de l'environnement, pour réaliser son parc, le porteur de projet doit obtenir l'autorisation d'exploiter au titre de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Le dossier de demande d'autorisation d'exploiter comprend notamment une étude d'impact, une étude de dangers et une enquête publique ;
- au titre du code de l'énergie, une autorisation d'exploiter, incluant si besoin l'avis des opérateurs de radars à proximité. Il fallait auparavant déposer une demande de raccordement vis-à-vis du gestionnaire du réseau public auquel le producteur souhaitait raccorder son installation ;
- au titre du code de l'urbanisme, les éoliennes dont la hauteur du mât est supérieure à 12 m sont soumises à permis de construire ;

42 Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement.

- dès lors que le fonctionnement du parc éolien conduit à atteindre au bon état de conservation d'une espèce protégée, une demande de dérogation à l'article L.411-1 du code de l'environnement est nécessaire ;
- au titre du code forestier, le porteur d'un projet éolien peut être soumis à l'obtention d'une autorisation de défrichement.

La procédure d'autorisation ICPE requiert l'établissement d'un dossier de demande d'autorisation adressé au préfet ainsi que la tenue d'une enquête publique, pour laquelle un commissaire enquêteur est désigné par le président du tribunal administratif (Articles R 512-14 et R 123-5 du Code de l'environnement). Définie par la Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 - art. 236 qui a modifié l'article L123-1 du code de l'environnement, « *L'enquête publique a pour objet d'assurer l'information et la participation du public ainsi que la prise en compte des intérêts des tiers lors de l'élaboration des décisions susceptibles d'affecter l'environnement.* ».

L'enquête publique, dont la durée est d'un mois minimum et de 2 mois maximum, est ouverte par un arrêté qui précise l'objet et la date de l'enquête. L'avis d'enquête publique doit être affiché, aux frais du demandeur et par les soins du maire, au moins 15 jours avant le début de l'enquête publique en mairie et dans le voisinage de l'installation. Le périmètre d'affichage comprend l'ensemble des communes concernées par les risques et inconvénients dont l'établissement peut être la source. L'avis d'enquête ainsi que les résumés non techniques doivent également être publiés sur le site internet de la préfecture.

À la fin de l'enquête publique, le demandeur est convoqué par le commissaire enquêteur qui lui communique le procès verbal. L'exploitant dispose alors d'un délai de 15 jours pour présenter ses observations éventuelles. Le dossier d'enquête est ensuite envoyé au préfet.

Concernant l'impact sonore, les ICPE sont soumises à des critères concernant :

- des niveaux maximum de bruit (niveau global et tonalités marquées) ;
- des niveaux maximum d'émergence sonore[43].

Dans une circulaire en date du 29 août 2011, le ministère en charge de l'écologie indique aux préfets que « *L'établissement par voie réglementaire de règles techniques ainsi que la possibilité d'en vérifier concrètement l'application après la procédure d'autorisation ou de déclaration devraient permettre également, à moyen terme, de limiter les contentieux contre les autorisations de champs éoliens* ».

Concernant l'impact sonore des projets éoliens, il est également précisé dans cette circulaire que, « *Si l'étude d'impact devra toujours traiter de cette question, les préfets pourront solliciter moins de démonstrations, de modélisations et d'expertises sur la capacité du pétitionnaire à tenir les objectifs d'émergence sonore affichés dans cette étude d'impact (et fixés par ailleurs dans les arrêtés ministériels). La police des installations classées permettra en effet de procéder, lorsque cela sera opportun, à des mesures de bruit lors du fonctionnement des aérogénérateurs et de prononcer des sanctions administratives, pouvant aller jusqu'à la suspension des installations, si ces mesures montrent que les dispositions prescrites ne sont pas tenues. Il convient de préciser ici, sur un plan technique, que les arrêtés ministériels s'appuient désormais sur les travaux de normalisation récents s'agissant de la mesure du bruit généré par les éoliennes. Une version quasi-finalisée de norme a ainsi été publiée en juillet 2011, c'est elle qui est retenue par les textes* (NDLR : projet de norme NFS 31-114, version de juillet 2011)*. Lorsque cette norme sera complètement finalisée et publiée, elle aura vocation à se substituer à la version temporaire de juillet 2011 »*.

[43] L'émergence est une modification temporelle du niveau sonore ambiant induite par l'apparition ou la disparition d'un bruit particulier.

3.1.1.1 Valeurs limites

Les limites admissibles d'émergence propres à la réglementation sur les bruits de voisinage sont conservées :

- 5 dBA pour la période de jour ;
- 3 dBA pour la période de nuit.

Ce critère d'émergence est à respecter dans les zones dites à émergence réglementée (ZER), c'est-à-dire les immeubles habités et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches (cour, jardin, terrasse).

Trois termes correctifs, fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit sont retenus :

- +3 dBA pour une durée supérieure à vingt minutes et inférieure ou égale à deux heures ;
- +2 dBA pour une durée supérieure à deux heures et inférieure ou égale à quatre heures ;
- +1 dBA pour une durée supérieure à quatre heures et inférieure ou égale à huit heures.

À ce critère d'émergence, s'ajoute une obligation de respect d'un niveau de bruit maximal en limite d'un périmètre de mesure défini par une distance R prise depuis le centre des aérogénérateurs, égale à 1,2 × (hauteur de moyeu + longueur d'un demi-rotor), voir Figure 20. Les valeurs limites retenues sont de 70 dBA le jour et de 60 dBA la nuit.

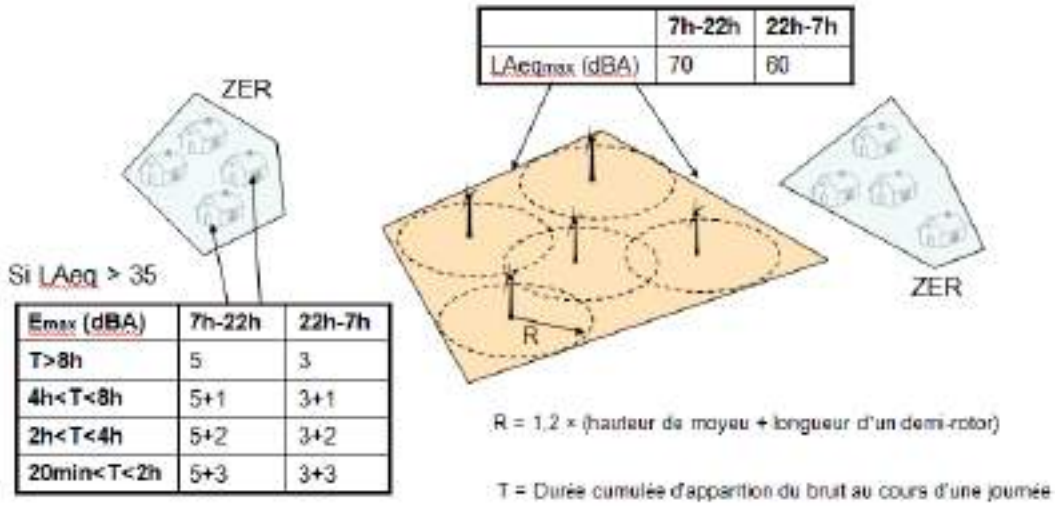


Figure 20 : représentation graphique du périmètre de mesure pour un parc éolien

Les tonalités marquées[44] sont prises en compte : dans le cas où le bruit particulier de l'installation est à tonalité marquée (au sens de l'arrêté du 23 janvier 1997), de manière établie ou cyclique, sa

[44] Définie par l'arrêté du 23 janvier 1997 : « *La tonalité marquée est détectée dans un spectre non pondéré de tiers d'octave quand la différence de niveau entre la bande de tiers d'octave et les quatre bandes de tiers d'octave les plus proches (les deux bandes immédiatement inférieures et les deux bandes immédiatement supérieures) atteint ou dépasse les niveaux indiqués dans le tableau ci-après pour la bande considérée :*

Cette analyse se fera à partir d'une acquisition minimale de 10 s		
50 Hz à 315 Hz	400 Hz à 1 250 Hz	1 600 Hz à 8 000 Hz
10 dB	5 dB	5 dB

Les bandes sont définies par fréquence centrale de tiers d'octave. »

durée d'apparition ne peut excéder 30 % de la durée de fonctionnement de l'installation, dans chacune des périodes diurne ou nocturne. Dernier apport de cette nouvelle réglementation, une norme de mesurage spécifique à l'éolien est désormais visée par cet arrêté (norme NFS 31-114). Cette norme répond notamment à la problématique posée par la mesure de bruit en présence de vent.

3.1.1.2 Distances minimum d'éloignement

En ce qui concerne les distances minimales d'implantation, celles déjà imposées par la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 (article 90) sont conservées : 500 mètres de toute construction à usage d'habitation ou zone destinée à l'habitation, 300 mètres d'une installation nucléaire de base ou d'une ICPE. De plus, pour pouvoir s'implanter à moins de 250 mètres d'un bâtiment à usage de bureaux, l'ombre projetée de l'installation ne doit pas impacter plus de trente heures par an et une demi-heure par jour le bâtiment. Cette dernière exigence relève d'une volonté de limiter l'impact potentiel lié aux effets stroboscopiques.

À l'occasion de la discussion sur la loi de transition énergétique, la distance de 1 500 mètres entre les éoliennes et les habitations, au lieu des 500 mètres prévus par le projet de loi, avait été évoquée dans le cadre d'un amendement. Cet amendement avait été retiré au bénéfice d'une distance de 1 000 mètres. Rejeté par la majorité de l'Assemblée nationale, ce texte a également échoué en commission mixte paritaire, dont le rôle est de trouver un compromis entre députés et sénateurs. De surcroît, la commission spéciale pour l'examen du projet de loi est revenue à la distance minimale de 500 mètres. L'Assemblée nationale a confirmé le 21 mai 2015 une distance minimale de 500 mètres entre une éolienne et des habitations dans le projet de loi de transition énergétique. Les députés ont également supprimé l'allongement à trente jours suggéré par le Sénat pour le délai de rétractation accordé à un propriétaire foncier ayant signé un bail avec un promoteur éolien.

3.1.2 Spécificités réglementaires pour les bruits basses fréquences, infrasons, vibrations et bruits solidiens émis dans l'environnement

La question de l'encadrement réglementaire des vibrations environnementales et des bruits solidiens émis dans l'environnement est évoquée dans un rapport établi pour le ministère de l'écologie et du développement durable par Elias *et coll.* en décembre 2007 : « Protection contre les vibrations environnementales : le cas français » (Elias *et al.* 2007). Ce rapport fait une étude détaillée du cadre institutionnel français et des pratiques, et dresse également un panorama complet des réglementations et pratiques à l'étranger (Royaume-Uni, Allemagne, Espagne, Suisse, USA).

Dans ce rapport, les auteurs soulignent la singularité française et le vide réglementaire concernant la protection des personnes contre les vibrations environnementales et les bruits solidiens émis dans l'environnement.

3.1.2.1 Circulaire de 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement

Dès 1986, dans une circulaire adressée aux préfets, le Ministre chargé de l'environnement avait fixé les normes d'émission de vibrations mécaniques que doivent respecter les installations classées pour la protection de l'environnement. Cette circulaire harmonisait également les moyens et les méthodes pour évaluer les effets des vibrations mécaniques transmises par les installations classées. L'application de la circulaire devait être appréciée après un an, mentionnant les difficultés rencontrées et les améliorations souhaitées pour en informer le Conseil supérieur des installations classées.

Deux méthodes d'analyse ont été proposées : une méthode de « contrôle » objet de la réglementation ; une méthode d'« expertise » à définir ultérieurement, qui devait avoir pour objet

l'étude des réponses des constructions aux vibrations transmises à celles-ci quels que soient les types de sources, de sols ou de constructions (mais cette méthode n'a jamais été élaborée).

La circulaire ne vise en fait que la protection des bâtiments en fonction de leur vulnérabilité aux vibrations, laissant de côté la gêne des occupants.

3.1.2.2 Infrasons

Il n'existe pas actuellement de réglementation française spécifique aux infrasons s'appliquant aux éoliennes ou à toute autre source sonore.

3.2 Principales réglementations étrangères spécifiques aux éoliennes

3.2.1 Allemagne

L'Allemagne est une république fédérale constituée de seize états fédéraux (*Bundesländer*). La loi fédérale de protection contre les nuisances environnementales (*Bundesimmisionsschutzgesetz, BimSchG*, 1974) concerne notamment les bruits.Trente-six ordonnances fédérales (*BImSchV*) ont été publiées en application de cette loi. Il n'existe pas en Allemagne de réglementation spécifique aux émissions sonores des éoliennes.

- **Dispositions générales**

Les lois des *Länder* sur l'aménagement de l'espace prévoient la consultation de la population préalablement à l'établissement des plans régionaux. La population est ainsi informée des lieux susceptibles d'accueillir des éoliennes. L'octroi du permis de construire est subordonné au respect de toutes les normes en vigueur, en particulier le code de l'urbanisme du *Land*, le plan municipal d'urbanisme et les divers textes relatifs à la protection de l'environnement.

Les aérogénérateurs dont la hauteur totale excède 50 mètres sont soumis à autorisation, en vertu des dispositions de la loi fédérale du 15 mars 1974 sur la protection contre les nuisances environnementales (*BImSchG*). L'évaluation des nuisances résulte d'un examen plus ou moins approfondi. L'exigence de l'étude d'impact est liée au nombre d'éoliennes dont l'implantation est envisagée. Lorsque le nombre d'éoliennes est inférieur à 20, l'étude d'impact est réalisée selon une procédure simplifiée.

Dans le cadre de la procédure d'autorisation, des prévisions de niveaux d'exposition (expertise sonore) doivent être présentées pour prouver le respect des valeurs indicatives. Outre les bruits des éoliennes, il convient également de tenir compte des bruits produits par d'autres sources commerciales, artisanales ou industrielles déjà existantes. À noter que les bruits de la circulation sont, quant à eux, considérés séparément. En outre, l'autorisation d'implantation d'éoliennes est de plus en plus souvent assortie d'une obligation imposant que les niveaux sonores des éoliennes soient mesurés, après leur mise en service, sur les lieux d'exposition pertinents.

À noter l'existence en Allemagne d'un groupe de travail sur les bruits générés par les éoliennes. Composé de représentants des autorités de protection contre les nuisances environnementales de nombreux *Länder*, des instituts de mesures et des fabricants d'éoliennes, ce groupe émet des recommandations spécifiques aux éoliennes pour le traitement des demandes d'autorisation.

- **Valeurs limites de bruit**

Les Instructions techniques de protection contre le bruit, ou ITP Bruit (*Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, TA Lärm*) définissent des valeurs indicatives d'exposition au bruit à respecter pour obtenir l'autorisation d'implanter une installation (applicable aux éoliennes de hauteur totale de plus de 50 m puisque soumises à autorisation). La protection est garantie lorsque les

nuisances totales générées sur le lieu d'émission concerné ne dépassent pas ces valeurs indicatives. Ces ITP Bruit prévoient des niveaux de bruit différents selon la destination de la zone considérée : industrielle, artisanale et commerciale, purement résidentielle, essentiellement résidentielle, *etc*., et le moment de la journée (voir Tableau 5).

Tableau 5 : valeurs limites des niveaux sonores mesurés à l'extérieur des constructions en Allemagne (*TA Lärm*)

	Le jour	**La nuit**
Zones industrielles	70 dBA	70 dBA
Zones d'activités	65 dBA	50 dBA
Zones centrales, zones rurales, zones mixtes	60 dBA	45 dBA
Zones résidentielles, zones réservées aux petits lotissements	55 dBA	40 dBA
Zones exclusivement résidentielles	50 dBA	35 dBA
Zones thermales, hôpitaux, établissements de soins	45 dBA	35 dBA

Les éoliennes étant en général implantées dans les zones extérieures définies par le Code allemand de l'urbanisme (*Baugesetzbuch*), la valeur indicative d'exposition retenue pour l'autorisation est principalement celle s'appliquant aux zones rurales et mixtes (valeur limite : 45 dBA la nuit). Au-delà de la prise en compte des tonalités marquées, le système allemand prend en compte différentes notions :

- terme correctif compris entre 3 et 6 dB pour prise en compte du caractère impulsionnel du bruit ;
- terme correctif compris entre 3 et 6 dB pour prise en compte des tonalités marquées et du caractère de signification ;
- cas d'un bruit permanent externe à l'installation.

À l'intérieur, les niveaux ne doivent pas dépasser les valeurs de 35 dBA le jour, et 25 dBA la nuit. Les bruits impulsionnels isolés (évalués sur une période cyclique de 5 secondes) ne doivent pas dépasser ces valeurs de plus de 10 dBA.

► **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

La norme DIN 45680:1997-03 définit le mesurage et l'évaluation des bruits basses fréquences (10 à 100 Hz) à l'intérieur des maisons (norme DIN 45680:1997 et TA Lärm 1998). Dans son principe, celle-ci prévoit de mesurer les niveaux de bruit basses fréquences et, si l'un des niveaux en tiers d'octave dépasse de 5 dB ou plus les niveaux des tiers d'octave adjacents, alors le bruit est considéré comme ayant un caractère tonal. Dans ce cas, les valeurs limites à considérer pour la période de nuit en intérieur sont ceux fixés dans le Tableau 6.

Lorsque la différence $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ (niveaux sonores équivalents à l'intérieur des bâtiments, déterminés avec les pondérations C et A) dépasse 20 dB, ces niveaux ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes avec l'indicateur L_r (voir Annexe 4) :

- jour : 35 dBA ;
- nuit : 25 dBA.

Tableau 6 : valeurs limites pour les bruits basses fréquences (norme DIN 45680) en Allemagne (périodes de nuit et de la journée)

Fréquence en Hz	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100
Seuil en dB(lin) non pondéré	103	95	87	79	71	63	56	48	41	34	33	34

Note : Valeurs limites établies par les travaux menés dans des régions industrielles par Piorr et Wietlake (Piorr et Wietlake 1990)

▶ Distances d'éloignement

Un certain nombre de *Länder* en Allemagne ont pris des décrets relatifs aux modalités d'implantation de parcs éoliens. Suivant les *Länder* (*Bund-Länder Initiative Windenergie*, 2012), les ordres de grandeur des distances recommandées varient comme suit ;

- logements isolés ou petits lotissements : 300 à 1 000 mètres ;
- zones résidentielles : 500 à 1 000 mètres.

En Rhénanie-du-Nord-Westphalie, une distance de 1 500 m est considérée comme offrant une bonne garantie contre les impacts environnementaux (WKA, 2005). Cette distance correspond à celle entre un parc éolien équipé d'aérogénérateurs de 2 mégawatts et une zone purement résidentielle, avec un objectif acoustique de limitation à 35 dBA.

Des distances plus courtes sont possibles, mais les niveaux sonores doivent être analysés et comparés aux valeurs limites fixées par la réglementation *TA-Lärm* 1998.

3.2.2 Danemark

▶ Dispositions générales

Au Danemark, la planification de l'installation des éoliennes est réalisée au niveau national ou municipal selon la hauteur des équipements. L'octroi du permis de construire une éolienne par la commune est subordonné au respect des plans d'urbanisme et des prescriptions de la circulaire du Ministre de l'environnement sur la planification des éoliennes en date de 1999. Cette circulaire préconise l'implantation de groupes d'éoliennes plutôt que d'éoliennes isolées.

Pour les contraintes environnementales, en application du règlement de 2006 sur les études d'impact, l'édification d'une éolienne isolée dont la hauteur dépasse 80 mètres ainsi que l'implantation d'un groupe d'au moins trois éoliennes (quelle que soit la hauteur de celles-ci) doit faire l'objet d'une étude d'impact environnemental.

▶ Valeurs limites de bruit

Le Danemark s'est doté depuis 1991 d'une directive spécifique au bruit des éoliennes. Une directive de 2006 (SO 1518, 2006) fixe les valeurs limites à respecter pour les habitations les plus proches. Le niveau de puissance acoustique de l'aérogénérateur est mesuré sur une platine située au niveau du sol à une distance égale à 1,5 fois la hauteur du mât, en aval du vent. Le niveau de pression acoustique est calculé[45] pour deux vitesses de vent : 8 m/s et 6 m/s.

[45] Les bases de calcul de la propagation du bruit sont décrites dans une directive de décembre 2011 (SO 1284, 2011).

Tableau 7 : valeurs limites à une distance de 15 mètres du bâtiment d'habitation le plus exposé au bruit au Danemark

	LAeq * (mesuré)	**LAeq, 10-160 Hz** (calculé)
Zones rurales (habitations isolées)	44 dBA pour une vitesse de vent de 8 m/s	20 dB pour une vitesse de vent de 6 m/s et 8 m/s
	42 dBA pour une vitesse de vent de 6 m/s	
Zones résidentielles (lotissements) et autres zones sensibles au bruit	39 dBA pour une vitesse de vent de 8 m/s	20 dB pour une vitesse de vent de 8 m/s et 6 m/s
	37 dBA pour une vitesse de vent de 6 m/s	

- *mesuré à 1,5 m du sol pour des vitesses de vent de 6 et 8 m/s mesurées à 10 mètres du sol

▶ Prise en compte des basses fréquences, infrasons et vibrations

En complément, le Danemark applique depuis 1997 des recommandations générales (c'est-à-dire non spécifiques aux parcs éoliens) relatives à l'exposition aux bruits basses fréquences, aux infrasons et aux vibrations à l'intérieur des habitations (Miljøstyrelsen 1997). Depuis la directive de 2011, ces valeurs limites s'appliquent aussi aux aérogénérateurs, pour des vitesses de vent de 6 et 8 m/s (parcs éoliens construits après le 1er janvier 2012). Contrairement aux autres sources de bruit basse fréquence, pour lequel les niveaux sont mesurés, ce niveau de bruit basse fréquence dû aux éoliennes est calculé.

La méthode préconisée fait appel à une combinaison de trois indicateurs (cf. Tableau 8) :

- le niveau pondéré A large bande ;
- le niveau pondéré A en tiers d'octave dans la bande 10-160 Hz, noté LpA,LF ;
- et le niveau équivalent pondéré G.

Un niveau d'accélération vibratoire maximum est également considéré (cf. Tableau 9).

Tableau 8 : valeurs limites recommandées au Danemark pour les basses fréquences et infrasons mesurés à l'intérieur des constructions

		Niveau pondéré A pA,LF (10-160Hz)	**Niveau pondéré G** LpG (ca. 5-20Hz)	**Niveau pondéré A** LAeq
Logements, établissements recevant de jeunes enfants	Soirée/Nuit (18h00-7h00)	20 dB	85 dB	30 / 25 dB
	Jour (7h00-18h00)	25 dB	85 dB	30 dB
Bureaux, écoles et autres locaux sensibles au bruit		30 dB	85 dB	40 dB
Autres locaux de sites industriels		35 dB	90 dB	50 dB

Pour les infrasons environnementaux, la *Danish Environmental Protection Agency* (DEPA) recommande que les niveaux d'exposition des citoyens soient inférieurs de 10 dB au seuil d'audibilité des infrasons. Le seuil d'audition étant réputé être égal, pour les sujets les plus sensibles, à environ 95 dBG, le DEPA recommande donc de ne pas dépasser une limite de 85 dBG, niveau moyen pondéré G intégré jusqu'à 20 Hz.

Tableau 9 : valeurs limites recommandées au Danemark pour les vibrations mesurées à l'intérieur des constructions

		Niveau d'accélération vibratoire maximum (dB)
Zones résidentielles	jour, soirée et nuit	75
Logements situés dans des zones mixtes (résidentielles et d'activité)	soirée et nuit	
Etablissements recevant de jeunes enfants	soirée et nuit	
Logements situés dans des zones mixtes (résidentielles et d'activité)	Journée	80
Bureaux, locaux d'enseignement, etc.		80
Locaux professionnels autres que bureaux		85

- **Distances d'éloignement**

La circulaire actuelle recommande que les éoliennes soient disposées selon un motif géométrique qui s'intègre dans le paysage et qu'une distance d'au moins 2,5 kilomètres sépare deux groupes d'éoliennes (ou deux éoliennes qui n'appartiennent pas au même groupe). En plus des valeurs limites de bruit présentées précédemment, une distance d'éloignement égale à quatre fois la hauteur de l'aérogénérateur est requise (distance minimum entre l'aérogénérateur et toute construction à usage d'habitation).

3.2.3 Finlande

- **Valeurs limites de bruit**

Une évaluation des niveaux de bruit effectuée suivant le guide publié à cet effet par le ministère de l'environnement est requise avant obtention du permis de construire d'un parc éolien. Un autre guide précise les modalités de mesure des niveaux sonores en accord avec les normes IEC 61400-11 et IEC 61400-14 pour les mesures de niveau sonore et de modulation d'amplitude. Le caractère impulsif du signal est mesuré suivant la norme NT ACOU 211.

Le gouvernement finlandais a établi en 2015 une nouvelle réglementation fixant les valeurs limites du bruit éolien, indiquées dans le Tableau 10. Il est à noter qu'une pénalité de 5 dBA s'applique en cas de tonalité marquée.

Tableau 10 : valeurs limites de bruit éolien en Finlande

	L_{Aeq} (mesuré)
Zones résidentielles, écoles, campings, *etc*.	45 dBA en journée (7h-22h)
	40 dBA en nuit (22h-7h)
Parcs naturels	40 dBA

À l'intérieur des habitations, la réglementation générale s'applique : le niveau de bruit moyen autorisé pour les pièces de vie est de 35 dBA en journée et de 30 dBA la nuit. Les mêmes valeurs limites sont utilisées pour les hôpitaux. Ces valeurs sont complétées par des valeurs limites par bande de fréquence (voir Tableau 11).

Tableau 11 : valeurs limites d'exposition au bruit dans les domiciles par bande de fréquences en Finlande

Fréquence en Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
$L_{Aeq,\ 1h}$ (dB)	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.4 Grande-Bretagne

- **Dispositions générales**

Au Royaume Uni, la construction d'éoliennes dont la puissance installée ne dépasse pas 50 MW est subordonnée à l'obtention d'un permis délivré par la commission de l'urbanisme de la collectivité locale. Le ministère du commerce et de l'entreprise a publié en octobre 2007 un guide d'instruction des permis de construire des éoliennes. Pour les installations dont la puissance installée dépasse 50 MW, la construction est soumise à une autorisation du Ministre du commerce et de l'entreprise qui vaut permis de construire.

Les contraintes environnementales sont prises en compte au moment de la planification et de l'octroi du permis. Dans certains cas, une étude d'impact sur l'environnement est nécessaire.

Le Royaume-Uni s'est doté (1996) d'une réglementation sur le bruit émis par les éoliennes. Cette réglementation résulte des travaux d'un groupe d'experts, dont le rapport porte la référence ETSU-R-97 (ETSU-R-97 1996). Ces recommandations décrivent une méthodologie pour les mesures sur des parcs éoliens et indiquent les niveaux de bruit ambiant à ne pas dépasser pour que les riverains soient protégés d'un bruit excessif sans restriction trop contraignante pour le projet. Elles ont été rédigées pour répondre à la problématique éolienne : mesures en présence de vent et analyses des niveaux sonores en fonction des vitesses de vent.

- **Valeurs limites de bruit**

Une des recommandations les plus importantes du document ETSU-R-97 est l'utilisation de l'indice statistique $LA_{90,10min}$ pour mesurer les niveaux résiduels et ambiants afin de « nettoyer » les mesures de bruits plus forts ou transitoires venant d'autres sources. Il est en outre recommandé de supprimer les données perturbées par des sources étrangères : pluie, flux particulièrement abondant d'un cours d'eau, *etc.* Les niveaux résiduels mesurés doivent être corrélés aux vitesses de vent mesurées sur site à une hauteur de référence de 10 mètres.

Pour des ambiances très calmes (zones rurales), la valeur du bruit ambiant (avec les éoliennes) ne doit pas dépasser une valeur limite comprise entre 35 et 40 dBA. La limite est fixée en fonction des critères suivants :

- nombre d'habitations concernées ;
- nombre de machines / puissance installée ;
- durée et niveau d'exposition sonore.

Pour la nuit, cette limite est fixée à 43 dBA[46] en environnement intérieur.

Au-delà de ces valeurs limites, le niveau de bruit dû au fonctionnement des éoliennes (L_{amb}) ne doit pas excéder de plus de 5 dBA le niveau du bruit résiduel, quelle que soit la période considérée. À noter que si la valeur du bruit résiduel augmentée de 5 dB dépasse 43 dBA, alors c'est cette valeur de bruit résiduel augmentée de 5 dB qui est à considérer comme valeur limite.

Enfin, lorsque l'occupant d'une habitation possède des intérêts financiers dans le parc éolien, les valeurs limites de la journée et de la nuit peuvent être relevées à 45 dBA $L_{A90,10\ min}$ et le critère d'émergence par rapport au niveau résiduel peut être augmenté.

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

Dans un rapport de 2005 établi par l'Université de Salford pour le ministère de l'Environnement britannique (DEFRA), Moorhouse *et al*. (Moorhouse, Waddington, et Adams 2005) ont proposé des critères d'évaluation de la gêne due aux bruits basses fréquences (de 10 à 160 Hz). Ils ont d'abord analysé ceux utilisés dans les autres pays européens, puis réalisé des tests de terrain et en laboratoire. Les critères proposés concernent le bruit à l'intérieur des habitations. Les mesures acoustiques sont réalisées dans une pièce non occupée (au moment de la mesure) où le résident a signalé « *qu'il entendait le bruit* ». Les niveaux L_{Aeq}, L_{10} et L_{90} sont mesurés pour chaque tiers d'octave de l'intervalle 10-160 Hz. Les niveaux L_{Aeq} sont alors comparés aux niveaux de référence présentés dans le Tableau 12. Ces valeurs limites peuvent être augmentées de 5 dB pour la période de la journée.

Tableau 12 : seuils recommandés au Royaume-Uni par le DEFRA pour l'exposition aux bruits de basses fréquences mesurées aux domiciles en période nocturne (23h-7h)

Fréquence en Hz	10	12.5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
Seuil en dB non pondéré dB(Lin)	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.5 Pays-Bas

- **Valeurs limites de bruit**

Les valeurs limites en L_{den} fixées dépendent du type de source et de la situation (trafics routier, ferroviaire et aérien, pour l'aviation militaire, les installations industrielles et les parcs éoliens). Celles retenues pour l'éolien (Concept-Circulaire 2009), applicables depuis le 1er janvier 2011, s'expriment au moyen des paramètres acoustiques européens L_{den} et L_{night}. En des lieux et locaux sensibles au bruit, les niveaux de bruit ne doivent pas excéder :

- 47 dBA en indicateur L_{den},
- 41 dBA en indicateur L_{night}.

[46] Cette limite est tirée du critère de perturbation du sommeil fixé à 35 dBA dans les chambres à coucher par la *Planning Policy Guidance Note 24* (PPG 24,). Une valeur de 10 dBA est ajoutée pour tenir compte de l'atténuation du bruit procurée par le bâtiment, fenêtre ouverte, et une correction de 2 dB est soustraite au titre de l'utilisation du $L_{A90,10\ min}$ au lieu du $L_{Aeq,10\ min}$.

Une valeur limite préférentielle de 40 dBA en indicateur L_{den} a par ailleurs été fixée.

Les autorités compétentes peuvent décider de prendre en compte les effets cumulatifs de parcs éoliens voisins, mais elles n'y sont pas obligées. De plus, elles ont la possibilité de fixer des valeurs limites différentes, afin de tenir compte de certaines particularités locales. Aucune pénalité n'est en revanche accordée au titre du caractère impulsionnel du bruit ou de la présence d'une tonalité marquée.

▶ Prise en compte des basses fréquences et infrasons

Les Pays-Bas ne disposent pas à proprement parler de réglementation spécifique aux bruits basses fréquences. Cependant, la Fondation néerlandaise sur la gêne due au bruit (NSG) a élaboré en 1999 des recommandations pour la mesure et l'évaluation des bruits basses fréquence (NSG 1999). Initialement destiné à la gestion des plaintes liées aux basses fréquences sonores, ce référentiel est par la suite devenu une base jurisprudentielle.

Ces recommandations servent notamment aux études d'impact de projets ferroviaires. Elles visent les bruits dont la fréquence est comprise entre 20 et 100 Hz, mais elles incluent des dispositions particulières pour les fréquences observées au-delà de cette fourchette. Elles définissent les conditions de mesure (appareillage, constante de temps, points de mesure, durée de mesure, *etc*.), les indicateurs, les valeurs de référence (seuil d'audition binaurale pour 10 % d'une population âgée de 50 à 60 ans), l'analyse et l'interprétation des résultats ainsi que le rapport de mesure.

La directive NSG n'est pas basée sur le critère de la gêne due aux basses fréquences, mais sur celui de leur audibilité. Dans le principe, la présence d'une composante basse fréquence potentiellement problématique est identifiée en comparant, dans l'intervalle 20-100 Hz, les niveaux de bruit non pondérés pour chaque tiers d'octave à une courbe de référence. Cette courbe de référence correspond aux seuils d'audition de la frange des 10 % les plus sensibles d'une population d'âge compris entre 50 et 60 ans. La tranche d'âge des 50-60 ans a été choisie car elle correspond aux Pays-Bas à la plus grande fréquence de plaintes.

Le niveau d'évaluation fait, quant à lui, appel à l'indicateur du niveau équivalent pondéré A L_{Aeq}. Il ne peut excéder 35 dBA le jour. Pour la période de nuit, une pénalité de 10 dBA s'applique et une pénalité de 5 dBA s'applique en cas de tonalité marquée. La valeur limite ne peut être inférieure à 20 dBA.

Tableau 13 : courbe de référence pour les bruits basses fréquences (20-100 Hz) préconisée par la Fondation néerlandaise sur la gêne due au bruit

Fréquence en Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Courbe de référence (SPL, dB)	92	88	84	74	64	55	46	39	33	27	22	18	14	10

Source : (NSG 1999)

▶ Distances d'éloignement

La législation néerlandaise impose une distance minimale d'éloignement par rapport aux habitations les plus proches. Cette distance est d'au minimum 4 fois la hauteur du mât, soit en pratique de l'ordre de 400 mètres et plus.

3.2.6 Pologne

▶ Valeurs limites de bruit

Les recommandations polonaises relatives à la détection des basses fréquences à l'intérieur des bâtiments ont été élaborées par le *Polish Building Research Institute* en 2001 (Mi01 2001). La méthode recommandée consiste à comparer les niveaux en tiers d'octave mesurés à l'intérieur des habitations à une courbe de référence définie sur l'intervalle 10-250 Hz, dénommée L_{A10} car, pour chaque fréquence, le niveau équivaut à celui d'une tonalité pure à 1 000 Hz d'énergie 10 dBA (voir Tableau 14).

Tableau 14 : courbe de référence pour les basses fréquences (10-250 Hz) à l'intérieur des habitations en Pologne

Fréquence en Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Courbe de référence (SPL, dB)	80,4	83,4	66,7	60,5	54,7	49,3	44,6	40,2	36,2	32,5	29,1	23,4	20,9	18,6

Source : (Mi01 2001)

Les bruits basses fréquences sont considérés comme gênants dès lors que les niveaux de pression acoustique :

- dépassent la courbe de référence ;
- et simultanément, dépassent de plus de 10 dB le niveau de bruit résiduel en cas de tonalité marquée et de plus de 6 dB pour le bruit à large bande.

▶ Distances d'éloignement

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.7 Suède

▶ Valeurs limites de bruit

La réglementation suédoise prévoit des valeurs limites de bruit au voisinage des parcs éoliens différentes selon le type de la zone considérée, ainsi qu'une pénalité de 5 dBA en présence de tonalité marquée (voir Tableau 15).

Tableau 15 : valeurs limites recommandées au voisinage de parcs éoliens en Suède

Type de zones	**Valeurs limites (L_{Aeq})** (pour une vitesse de vent de 8 m/s)
Zones résidentielles	40 dBA
Zones rurales	35 dBA
Zones résidentielles à proximité d'une zone industrielle	40 dBA
Autres zones	40 dBA

Source : Naturwårdverket – Swedish environmental agency http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledningar/Buller/Buller-fran-vindkraft/buller-vindkraft-riktvarden/ (site consulté en septembre 2016)

Les recommandations suédoises relatives à l'exposition au bruit à l'intérieur des constructions sont édictées par le *Socialstyrelsen*, une agence gouvernementale placée sous l'autorité du Ministère de la santé et des affaires sociales. Un texte de 2005 (SOSFS 2005:6) fixe les valeurs limites (voir Tableau 16).

Tableau 16 : valeurs limites de bruit à l'intérieur des constructions en Suède

Types de constructions concernées	Indices	Valeurs limites (dBA)
Pièces principales de logements et d'hébergements de loisirs. S'applique aussi aux établissements d'enseignement, aux établissements de santé et aux chambres situées dans des locaux d'hébergement temporaire.	Niveau de bruit maximum (L_{AFmax})	45
	Niveau de bruit équivalent (L_{AeqT})*	30
	Bruit comportant une tonalité marquée (L_{AeqT})	25
	Bruit associé à la diffusion de musique amplifiée (L_{AeqT})	25

* T est la période d'intégration

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

La présence d'une composante basse fréquence pour ces niveaux de bruit en intérieur est détectée en mesurant la différence entre le niveau équivalent pondéré C et le niveau équivalent pondéré A. Une analyse en fréquence portant sur l'intervalle [31,5 - 200 Hz] et basée sur les valeurs limites par tiers d'octave (voir Tableau 17), est effectuée dès que l'écart entre LC_{eq} et LA_{eq} dépasse 15 à 20 dB. Le bruit est considéré comme gênant dès lors qu'une valeur limite est dépassée dans au moins un des tiers d'octave considérés.

Tableau 17 : courbe de référence pour les bruits de basses fréquences (31,5 – 200 Hz) à l'intérieur des habitations en Suède

Fréquence en Hz	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Courbe de référence en dB	56	49	43	41,5	40	38	36	34	32

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.8 Suisse

- **Dispositions générales**

En Suisse, la construction d'une éolienne, quelle que soit la hauteur d'installation envisagée nécessite un permis de construire.

Pour la gestion des contraintes environnementales et depuis la révision de l'ordonnance fédérale du 19 octobre 1988 relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (ORD 814.011), entrée en vigueur le 1er décembre 2008, les installations d'exploitation de l'énergie éolienne d'une puissance installée supérieure à 5 MW sont soumises à une étude d'impact sur l'environnement (EIE). Celle-ci est effectuée conformément à une procédure définie par le droit cantonal, mais qui doit respecter certains principes fixés au niveau fédéral.

Par ailleurs, pour les projets dont la réalisation n'est pas subordonnée à une étude d'impact sur l'environnement, les cantons et les auteurs des projets doivent suivre des « Recommandations pour la planification d'installations éoliennes »(OFEN-OFEV-ARE 2010), éditées conjointement par les offices fédéraux du développement territorial (ARE), de l'environnement (OFEV) et de l'énergie (OFEN) en mars 2010.

▶ Valeurs limites de bruit

L'évaluation du bruit est définie par les dispositions de la loi du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE 1983) et de l'ordonnance du 15 décembre 1986 sur la protection contre le bruit (ORD 814.41 1986). Pour les éoliennes, les valeurs limites d'exposition au bruit de l'industrie et des arts et métiers sont applicables. Cette ordonnance ne régit en revanche pas la protection contre les infrasons et les ultrasons (Chapitre 1, article 1, alinéa 3.b).

Les immissions[47] de bruit doivent être déterminées et évaluées dans le cadre de la procédure d'autorisation. À titre préventif, les immissions de bruit dues exclusivement à l'installation en cause ne peuvent dépasser les valeurs de planification visées à l'annexe 6 de l'OPB (voir Tableau 18). Toutefois, l'autorité d'exécution peut accorder des allégements dans la mesure où le respect des valeurs de planification « *constituerait une charge disproportionnée pour l'installation et que cette dernière présente un intérêt public prépondérant, notamment sur le plan de l'aménagement du territoire* ». Lorsque des allégements sont accordés, il est tenu compte des nuisances sonores, du nombre de personnes concernées et de l'avantage que représente la production d'énergie. L'exécution de ces dispositions incombe aux cantons.

Tableau 18 : valeurs limites d'exposition au bruit éolien en Suisse

Zone de sensibilité considérée	Valeur de planification (en dBA)		Valeur d'immission (en dBA)		Valeur d'alarme (en dBA)	
	jour	nuit	jour	nuit	jour	nuit
1 : zone de détente	50	40	55	45	56	60
2 : zone d'habitation et de construction publique	55	45	60	50	70	65
3 : zone d'habitation mixte avec activités artisanales et zones agricoles	60	50	65	55	70	65
4 : zone industrielle	65	55	70	60	75	70

La mesure de l'exposition (niveau d'évaluation L_r) se compose du niveau moyen équivalent de l'immission sonore L_{Aeq}, d'une correction temporelle ainsi que de corrections de niveau (K1, K2, K3) qui tiennent compte des caractéristiques de gêne spécifiques du bruit.

Une correction de niveau K2 prend en considération l'audibilité des composantes tonales du bruit au lieu d'immission. La correction est comprise entre 0 et 6, suivant l'importance des composantes tonales marquées. Une seconde correction de niveau K3 prend en considération l'audibilité du caractère impulsionnel du bruit au lieu d'immission. La correction K3 est également comprise entre 0 et 6, suivant l'importance du caractère impulsionnel de la source de bruit.

▶ Distances d'éloignement

En août 2004, l'Office fédéral de l'énergie, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et l'Office fédéral du développement territorial ont publié un document intitulé « Concept d'énergie éolienne pour la Suisse » en réponse à une demande adressée à la Confédération par les organisations de protection de la nature ainsi que par plusieurs cantons, qui souhaitaient disposer de « bases conceptuelles supra-cantonales pour le développement de parcs éoliens ». Ce document, qui n'est pas contraignant juridiquement, est destiné à servir de base de

[47] Immission est un terme spécifique à la Suisse. Cela correspond au niveau maximum de bruit admissible au niveau d'une fenêtre ouverte.

planification aux cantons et aux communes. Il précise notamment que la distance minimale entre une éolienne d'au moins 70 mètres de hauteur (au niveau du moyeu) et une zone urbanisée ou une habitation doit être de 300 mètres.

3.2.9 Australie

En Australie, les émissions sonores de parcs éoliens sont soumises à la réglementation de chaque état. Les normes et recommandations en vigueur dans les états de Nouvelles Galles du sud et de l'Australie du sud comptent parmi les plus récemment adoptées, ainsi que parmi les plus exigeantes au monde.

3.2.9.1 Australie du sud

- **Valeurs limites de bruit**

L'État de l'Australie du sud (SouthAustralia-EPA 2009) fixe deux valeurs limites :

- une valeur limite pour les éoliennes en fonctionnement de 35 dBA $LA_{eq,10}$ dans les zones rurales (40 dBA LAeq,10 dans les autres zones) ;
- une émergence de 5 dBA à ne pas dépasser par rapport au niveau du bruit résiduel ($L_{Aeq,90,10min}$).

La valeur retenue est la plus grande de ces deux valeurs et une pénalité de 5 dBA est appliquée en cas de bruit à caractère tonal. Les projets séquencés ou les extensions de projets existants doivent respecter le critère du bruit résiduel initial (avant la première installation).

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

Si aucune norme australienne n'a encore établi les bases d'un protocole objectif d'identification des bruits basses fréquences, le ministère de l'environnement voit dans la comparaison des niveaux équivalents en pondération C et A un bon candidat à un tel protocole.

Dans un document de 2013 (Turnbull, Turner, et Walsh 2012), l'Agence de l'environnement de l'État d'Australie du sud (SA-EPA) fait état de recommandations établies par le *Queensland Department of Environment and Resource Management's* (DERM), dans « *Draft ECOACCESS Guideline – Assessment of Low Frequency Noise* ». Elles prévoient un niveau limite de 85 dBG dans les logements (niveau comparable à celui recommandé au Danemark). Mais ce document n'a jamais été officiellement rendu public, il n'a même jamais franchi l'étape du projet.

Cette « *valeur prudente* », située entre 5 et 10 dB au-dessous de la courbe du seuil d'audition, confère selon la SA-EPA une marge de sécurité par rapport à la variabilité des sensibilités auditives et notamment les différences de seuils d'audition entre les infrasons purs et les infrasons large bande. La Figure 21 illustre la comparaison des valeurs limites fixées par le DERM avec les seuils d'audition entre 0,5 et 20 Hz établis par Watanabe & Møller (Watanabe et Møller 1990), ou encore par la norme DIN 45680 en Allemagne.

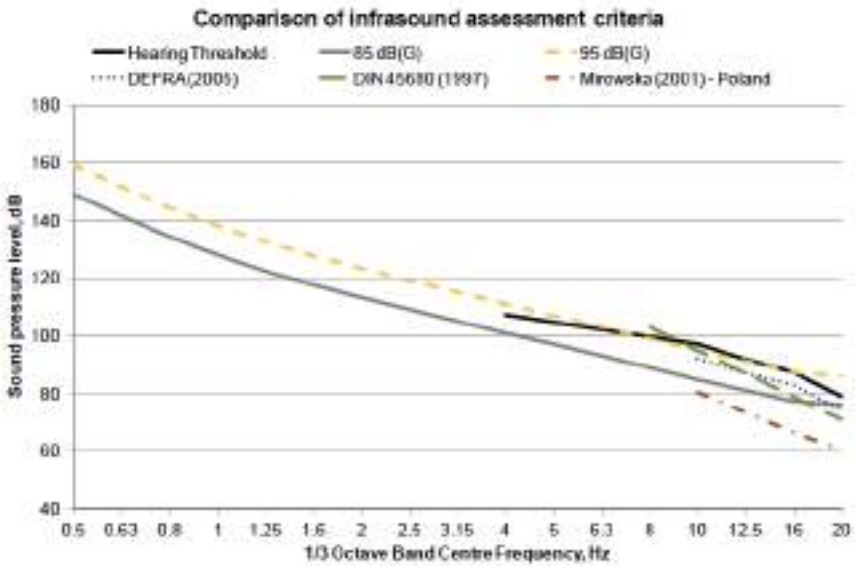


Figure 21 : comparaison de la valeur limite de 85 dBG préconisée par le DERM avec celui de l'audition humaine et le seuil fixé par la norme DIN 45680 entre 0,5 et 20Hz

Source : (Turnbull, Turner, et Walsh 2012)

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.9.2 Nouvelles Galles du sud

L'État de Nouvelles Galles du sud est sur le point d'adopter de nouvelles recommandations relatives aux conditions d'implantation des parcs éoliens. Ces prescriptions sont actuellement rassemblées dans un document temporaire, les *Draft NSW Planning Guidelines Wind Farms* (NewSouthWales-Government 2011).

- **Valeurs limites de bruit**

Une annexe intitulée *NSW Wind Farm Noise Guidelines* fixe les valeurs limites à respecter. Pour les nouveaux projets, le niveau prévisionnel équivalent pondéré A $L_{Aeq,\ 10min}$ (après correction éventuelle pour tonalité marquée, modulation d'amplitude ou basses fréquences) ne doit pas dépasser :

- une valeur limite de 35 dBA ;
- une émergence de 5 dBA par rapport au niveau résiduel mesuré en L_{90}.

Les indicateurs de bruit doivent être évalués séparément pour la période de la journée (7h00-22h00) et la période de nuit (22h00-7h00). Le niveau résiduel L_{90} doit être mesuré à la fois avant et après la réalisation du parc éolien, ceci afin de quantifier l'impact sonore du parc sur le bruit de fond. D'autres mesures liées aux audits et à la concertation sont également prévues, comme notamment la possibilité pour les riverains du parc de solliciter une expertise acoustique indépendante une fois le projet réalisé.

En cas de tonalité marquée, une pénalité de 5 dB doit être ajoutée au niveau de bruit prévisionnel ou mesuré. Une pénalité de 5 dBA est également appliquée en cas de modulation d'amplitude avérée. La notion de modulation d'amplitude excessive correspond à une variation du niveau sonore de plus de 4 dBA synchronisée avec la fréquence de rotation des pales. Ces pénalités ne s'appliquent qu'aux points de réception pour lesquels ces caractéristiques sont observées.

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

Lorsque le niveau équivalent pondéré C (mesuré à partir de 20 Hz) émis par un parc éolien est fréquemment supérieur à 65 dBC en journée ou à 60 dBC la nuit, une analyse détaillée des composantes basses fréquences doit être effectuée. Lorsque cette analyse confirme que des niveaux excessifs dans les basses fréquences (supérieurs au seuil d'audition humain) sont présents dans des lieux d'habitation « non associés », une pénalité de 5 dB est alors appliquée au niveau (prévisionnel ou mesuré) du bruit émis par le parc éolien. Ces niveaux pondérés C mesurés ou extrapolés, s'ils sont inférieurs aux valeurs limites, suffisent pour conclure à l'absence d'exposition excessive aux bruits de basses fréquences.

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.10 Canada

Au Canada, les émissions sonores de parcs éoliens sont soumises aux réglementations spécifiques de chaque province. À l'échelle nationale, Santé Canada (HealthCanada 2010) recommande que des mesures de protection à la source soient prises dès lors que la somme énergétique des niveaux de bruit dans les bandes d'octave 16 Hz, 31,5 Hz et 63 Hz dépasse 70 dBA, ceci afin de prévenir tout risque de vibration (*rattling)* au sens de la norme ANSI de 2005.

3.2.10.1 Alberta

- **Valeurs limites de bruit**

La « Directive 038 *Noise Control* : 2007 » publiée par l'*Energy Resources Conservation Board* décrit les exigences requises en matière d'évaluation et de réduction du bruit émis par les projets liés à l'énergie. Elle fixe les valeurs limites de bruit, appelées *permissible sound level* (PSL) et déterminées à partir du *basic sound level* (BSL) et de différents correctifs, selon la situation. Le BSL est établi en fonction de la densité d'unités d'habitation et de l'intensité du trafic routier à proximité. En l'absence d'habitations à moins de 1,5 kilomètre des limites de propriétés, cette limite de bruit (PSL) est fixée à un niveau acoustique équivalent de 40 dBA.

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

Depuis la révision 2007 de ces recommandations, ce document comprend des sections prenant en compte les parcs éoliens (méthode de mesure) ainsi que la problématique des basses fréquences dans le cadre d'études de plaintes. Ainsi, une pénalité de 5 dB est attribuée à la valeur limite PSL initialement fixée lorsque la présence de niveaux excessifs dans les basses fréquences est expérimentalement vérifiée à l'aide d'un des critères suivant :

- la différence L_{Ceq} - L_{Aeq} dépasse 20 dB ;
- une composante tonale existe en dessous de 250 Hz.

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.10.2 Ontario

- **Valeurs limites de bruit, prise en compte des basses fréquences et infrasons**

En Ontario, les recommandations relatives à l'évaluation du bruit dans l'environnement ne prévoient pas à ce jour de prise en compte particulière des bruits basses fréquences ou des infrasons émis par les parcs éoliens. Une correction de 5 dB est néanmoins prévue lorsque les données du fabricant indiquent la présence de tonalités marquées, celles d'origine mécanique se situant généralement dans les basses fréquences (Evans, Cooper, et Lenchine 2013).

Dans un document de 2009 intitulé « *Proposed Content for the Renewable Energy Approval Regulation under the Environmental Protection Ac*t » (Ontario_Ministry_of_Environment 2009) il est proposé que l'approbation des projets de parcs éoliens soit conditionnée par la surveillance et la prise en compte des bruits basses fréquences et des infrasons perceptibles. Le ministère de l'environnement a fait part d'une intention de publier un guide technique pour assister les porteurs de projets dans la surveillance des émissions basses fréquence et des infrasons.

- **Distances d'éloignement**

Les éoliennes de plus de 50 kW produisant un niveau de puissance acoustique L_WA supérieur à 102 dBA doivent maintenant respecter la distance minimale de 550 m de tout bâtiment fréquenté.

3.2.11 États- Unis d'Amérique

Les États-Unis d'Amérique ne possèdent pas de législation nationale en matière d'impact sonore des parcs éoliens. Des réglementations évoluent dans les différents États, à mesure que les projets se développent. Quand aucune législation n'existe, les valeurs limites font référence à des ordonnances édictées par l'autorité de gouvernance locale ou se réfèrent aux recommandations nationales en matière de bruit dans l'environnement, telles que celles de l'Agence américaine de l'environnement (*Environmental Protection Agency*, US-EPA).

- **Valeurs limites de bruit**

L'US-EPA a publié en 1974 des recommandations relatives aux niveaux d'exposition au bruit dans l'environnement, dont une directive sur la protection de la santé publique (US-EPA 1974). Cette directive, qui n'avait pas vocation à s'appliquer au bruit éolien et concerne surtout la protection du public en général, préconise deux valeurs limites (valeurs guides censées assurer la protection du public avec une marge suffisante de sécurité) à respecter :

- 45 dBA en L_{dn} : niveau moyen à l'intérieur des habitations à respecter en zone rurale ou résidentielle ;
- 55 dBA en L_{dn} : niveau à l'extérieur d'une habitation à respecter en zone rurale ou résidentielle.

En général, les États américains fixent des valeurs limites nettement supérieures (50 ou 55 dBA) à celles en vigueur en France ou en Australie. La Figure 22 présente un résumé de ces valeurs limites.

Governing Jurisdiction	Noise Metric	Rural Area	Residential Area	Residential Area Near Industrial Area	Other Areas
United States of America	No National Legislation for Wind Turbine Noise EPA: Ldn [dB(A)]	Ldn: 55	Ldn: 55	---	---
Colorado	No State Legislation for Wind Turbine Noise				
Colorado - Arapahoe County	LAeq [dB(A)]	---	Day: <55 Night: <50	---	Day: <65-<80 Night: <60-<75
Georgia	LAeq [dB(A)]	55	55	55	55
Illinois	Octave Band Analysis (see Table 6)				
Indiana	No State Legislation for Wind Turbine Noise				
Indiana - Tipton County	Octave Band Analysis (see Table 7)				
Michigan	LAeq [dB(A)]	55 or background + 5 dB(A)	55 or background + 5 dB(A)	55 or background + 5 dB(A)	55 or background + 5 dB(A)
Michigan - Huron County	LA90 [dB(A)]	55 or background + 5 dB(A)	50 or background + 5 dB(A)	55 or background + 5 dB(A)	55 or background + 5 dB(A)
Minnesota	LAeq [dB(A)]	50	50	50	---
Minnesota - Lincoln County	LAeq [dB(A)]	50	50	50	---
Nevada	No State Legislation for Wind Turbine Noise				
Nevada - Lyon County	LAeq [dB(A)]	55	55	55	55
New Mexico	No State Legislation for Wind Turbine Noise				
New Mexico - San Miguel County	LAeq [dB(A)]	< background	< background	< background	< background
New York	No State Legislation for Wind Turbine Noise				
New York - Town of Jefferson	LA10 [dB(A)]	---	50 or background + 5 dB(A)	---	---
North Carolina	LAeq [dB(A)]	55	55	55	---
Oregon	LA50	Day: 55 Night: 50			
Pennsylvania	No State Legislation for Wind Turbine Noise				
Pennsylvania - Potter County	LAeq [dB(A)]	background + 5 dB(A)	background + 5 dB(A)	background + 5 dB(A)	background + 5 dB(A)
Wisconsin	LAeq [dB(A)]	Day: 50 Night: 45			

Figure 22 : résumé des valeurs limites en vigueur dans les différents États et comtés aux États-Unis.

Source : (Fowler, Koppen, et Matthis 2013)

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

L'État d'Illinois fixe des valeurs limites par bande d'octave pour les bruits émis depuis une zone classée C (zone industrielle, dont parc éolien) vers une zone classée A (zone (zone résidentielle), (voir Tableau 19).

Tableau 19 : valeurs limites de bruit éolien par bandes d'octave pour une zone résidentielle pour l'État d'Illinois (USA)

Bandes d'octave (en Hz)	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Valeur limite L_{eq} pour le jour (dB)	75	74	69	64	58	52	47	43	40
Valeur limite L_{eq} pour la nuit (dB)	69	67	62	54	47	41	36	32	32

Le comté de Shawano (Wisconsin) fixe un premier critère lié au bruit résiduel : en limite de propriété des habitations voisines du parc éolien, le bruit éolien ne peut dépasser de plus de 5 dBA et pendant plus de 5 minutes les niveaux résiduels mesurés sur une période d'une heure. Cette ordonnance (Shawano County) est la seule parmi les 24 exemples analysés par Fowler (Fowler, Koppen, et Matthis 2013) à exiger une analyse fréquentielle par tiers d'octave dans les basses fréquences, et même dans les infrasons : aucun bruit basses fréquences ou infrason dû au fonctionnement des aérogénérateurs ne peut, dans un rayon de 1 *mile* (1 600 mètres environ) autour du parc éolien, dépasser les valeurs limites présentées dans le Tableau 20.

Tableau 20 : valeurs limites de bruit éolien par bandes d'octave en limite de propriété des habitations dans le comté de Shawano (Wisconsin-USA)

Bandes de tiers d'octave (en Hz)	1-2	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Niveau de pression sonore (SPL, dB)	70	68	68	67	65	62	60	57	55	52	50	47	45	42	40	37	35

Dans le comté de Calumet (Wisconsin), une ordonnance de 2007 (Calumet County 2007) prévoit des exigences relatives aux bruits de basses fréquences émis par les parcs éoliens. L'évaluation de la présence d'une composante basse fréquence fait appel au critère L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20 dB, en association avec les valeurs guides par bande d'octave précisées dans le Tableau 21.

Tableau 21 : valeurs guides de bruit éolien (en dB) par bandes d'octave en limite de propriété des habitations dans le comté de Calumet (Wisconsin-USA)

Band No.	1/3 Octave Band Center Frequency (Hz)	Limits for 1/3 Octave Bands	Limits for 1/1 Octave Bands
1	1.25 and below	65	
2	1.6	65	
3	2	65	70
4	2.5	65	
5	3.15	65	
6	4	65	70
7	5	65	
8	6.3	65	
9	8	65	70
10	10	65	
11	12.5	61	
12	16	61	65
13	20	61	
14	25	60	
15	31.5	58	63
16	40	58	
17	50	58	
18	63	55	61
19	80	53	
20	100	52	
21	125	50	55

Dans l'État de l'Oregon, le *Department of Environmental Quality* (DEQ) a publié des recommandations relatives au bruit dans l'environnement qui sont réunies au sein de l'*Oregon Administrative Rule Chapter 340, Division 35*.

Les émissions sonores large bande des éoliennes sont explicitement concernées par ces recommandations. Les règles relatives aux installations industrielles prévoient quant à elles un critère basses fréquences qui descend jusqu'à 31,5 Hz (65 dBA la nuit), ainsi qu'un chapitre dédié aux tonalités marquées, incluant une procédure détaillée permettant de déterminer si une totalité est interdite ou non.

3.2.12 Nouvelle Zélande

- **Valeurs limites de bruit**

La Nouvelle Zélande s'est dotée en 2010 d'une norme dédiée au bruit des parcs éoliens, la *NZS 6808:2010 Acoustics – Wind farm*. Celle-ci détermine l'utilisation d'un indicateur statistique LAeq,90, 10min afin d'évaluer le bruit éolien et le bruit résiduel ainsi que des niveaux de bruit à ne pas excéder (éoliennes en fonctionnement) au niveau des zones représentatives des lieux de vie à l'extérieur de chaque habitation :

- 5 dBA de plus que la valeur du bruit résiduel ;
- et une valeur limite de 40 dBA $L_{Aeq,90,\ 10min}$.

La plus grande de ces valeurs est retenue comme valeur limite.

Dans les zones particulièrement calmes, une valeur limite plus exigeante (35 dBA, ou le niveau résiduel + 5 dB) est recommandée pour les périodes de soirée et de nuit.

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.13 Japon

- **Valeurs limites de bruit**

La norme relative à la qualité de l'environnement sonore, basée sur l'article 9 de la *Basic Law for Environmental Pollution Control*, a introduit en 1971 des valeurs limites de bruit (L_{Aeq}) à respecter. Celles-ci ont été révisées en 1998 et recommandent, pour les zones résidentielles, une valeur limite de 55 dBA de jour et de 45 dBA de nuit. Pour les zones « particulièrement sensibles » au bruit, les valeurs limites sont de 5 dB inférieures. Pour les zones à vocation commerciale et/ou industrielle, elles sont de 5 dBA supérieures.

La réglementation relative aux émissions sonores des activités industrielles (*Noise Regulation Law,* 1970, dernière révision : 2001) prévoit des valeurs limites applicables en limite du site industriel (voir Tableau 22).

Tableau 22 : valeurs limites d'exposition en limite de site industriel au Japon

Typologie du son	Indices	Valeurs limites
Son régulier	L_{AF}	50-60 dBA (jour)*
Son fluctuant de manière continue	$L_{AF,5}$**	45-50 dBA (matinée et soirée)
Son à caractère impulsionnel pour lequel les niveaux crête pondérés A avec pondération temporelle F sont inégaux	L_{AFmax5}***	40-50 dBA (nuit)

* Valeurs limites et périodes horaires définies par les autorités locales

** $L_{AF,5}$: Niveau continu équivalent pondéré A à pondération temporelle F dépassé pendant 5% de la période de mesure

*** L_{AFmax5} : niveau équivalent aux 5 % des niveaux crête les plus élevés pour les périodes de la journée considérées

- **Prise en compte des basses fréquences et infrasons**

Devant la recrudescence des plaintes liées à l'exposition aux bruits basses fréquences, le Ministère en charge de l'environnement a publié en 2004 un « guide d'évaluation » des bruits basses fréquences émis par des sources stationnaires (Japan Handbook 2004).

Deux protocoles de mesure sont appliqués. Lorsqu'il s'agit de plaintes liées à des vibrations d'éléments intégrés au bâtiment (*rattling of fittings* tels que les vitres, portes coulissantes, *etc*.), les mesures sont réalisées à l'extérieur, à une distance de 1 ou 2 mètres du bâtiment, et le niveau de pression acoustique est évalué pour les bandes de tiers d'octave comprises entre 5 et 50 Hz.

Lorsqu'il s'agit de situations où les personnes gênées rapportent un inconfort d'ordre psychologique ou physique, les mesures sont réalisées à l'intérieur de l'habitation, en un seul point de mesure, désigné par le plaignant. Les mesures sont dans ce cas réalisées pour les bandes de tiers d'octave comprises entre 10 et 80 Hz (voir Tableau 23). À noter qu'une valeur limite pondérée G, fixée à 92 dBG, est également appliquée pour les situations d'inconfort.

Tableau 23 : valeurs de référence pour les bruits de basses fréquences en vigueur au Japon

Fréquence (en Hz)	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Vibration d'éléments intégrés au bâtiment (valeurs en dB)	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99	–	–
Inconfort physique et psychologique (valeurs en dB)	–	–	–	92	88	83	76	70	64	57	52	47	41

Source : (Japan Handbook 2004)

- **Distances d'éloignement**

Aucune distance minimale d'éloignement de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

3.2.14 Recommandations de l'OMS

En 2000, l'OMS publiait ses valeurs guides pour l'exposition au bruit, dans un document intitulé « *Guidelines for Community Noise* ». Les lignes directrices fixées par l'OMS constituent des objectifs dont il convient de se rapprocher, même si elles paraissent difficiles à respecter en zone urbaine dense.

Pour cet organisme, le seuil d'exposition diurne au-dessus duquel on peut craindre que des manifestations sanitaires se produisent se situe aux alentours de 50/55 dBA en $LA_{eq,16h}$. Pendant

la journée, peu de gens sont fortement gênés à des niveaux L_{Aeq} inférieurs à 55 dBA, ou modérément gênés pour des L_{Aeq} inférieurs à 50 dBA.

Ces valeurs sont cohérentes avec des recommandations plus anciennes formulées par l'ISO ou par un certain nombre d'autorités environnementales nationales et internationales.

Dans ce même guide de recommandations publié en 2000, l'OMS préconise, en cas de bruit continu, un niveau de bruit à l'intérieur des habitations n'excédant pas 30 dBA. Le document fait l'hypothèse qu'une fenêtre ouverte apporte un isolement de 15 dBA, ce qui correspond donc à un niveau en façade de 45 dBA. Toutefois, on notera que le document indique qu'en cas de bruit basse fréquence significatif, des niveaux encore moins élevés devraient être considérés afin de prévenir les perturbations du sommeil.

En revanche, aucune recommandation spécifique liée à l'impact sonore ou aux infrasons émis par des parcs éoliens n'est formulée, même si les directives OMS incluent une recommandation générale qui préconise de conduire une analyse en fréquences dès lors que la différence entre le niveau pondéré C (ou sans pondération, dBlin) et le niveau pondéré A dépasse 10 dB.

Le document plus récent publié par l'OMS en 2009 (*Night noise guidelines for Europe*) ne prévoit pas non plus de recommandation relative aux basses fréquences, aux infrasons ou aux parcs éoliens (OMS 2009).

3.3 Autres réglementations étrangères d'intérêt s'appliquant aux basses fréquences et infrasons d'autres sources

Bien que non directement comparables au cas des éoliennes (niveaux sonores et/ou de gamme spectrale différents, contexte professionnel ou environnemental, etc.), les réglementations existantes s'appliquant aux basses fréquences sonores, infrasons et vibrations issus d'autres sources que les éoliennes ont également été recherchées.

3.3.1 Bruit et vibrations dues au transport ferroviaire (Danemark)

Des valeurs limites recommandées pour le bruit ferroviaire ont été publiées en juillet 2007 dans un supplément aux lignes directrices de la *Danish Environmental Protection Agency*. Elles reposent sur l'utilisation du L_{den}, (valeurs limites dans le Tableau 24), d'un niveau sonore maximum de 85 dB exprimé en L_{Amax} et incluent un niveau d'accélération vibratoire maximum de 75 KB[48].

Tableau 24 : valeurs limites en Lden pour le bruit ferroviaire applicables au Danemark

Zonage d'urbanisme	L_{den}
Zones à vocation récréative situées en environnement rural (zones d'hébergement de loisirs, terrains de camping, etc.)	59 dB
Zones à vocation récréative situées en environnement urbain (parcs, campings municipaux, etc.)	64 dB
Zones résidentielles (logements, zones à vocation d'activités de plein air)	64 dB
Zones d'activités publiques (hôpitaux, institutions, écoles, universités, etc.)	64 dB
Zones d'activités commerciales (hôtels, bureaux, etc.)	69 dB

[48] abréviation allemande pour « *Kennwerte fur die Beurteilung von Erschütterungen* » ce qui signifie caractéristiques pour l'évaluation des vibrations. KB est la valeur RMS (ou efficace) des niveaux vibratoires, proportionnelle à la vitesse (en mm/s) mais sans dimension car divisé par v0 = 1 mm/s (voir http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/Bru_56.PDF).

3.3.2 *Ferrys* à grande vitesse (Danemark)

Il est à noter que, au Danemark, l'intervalle 10-160 Hz est également pris en compte pour l'instruction des permis d'exploitation des *ferrys* à grande vitesse (SO 821, 1997). Des valeurs limites recommandées à l'intérieur des logements sont donc disponibles en $L_{Aeq\ (10\text{-}160Hz)}$ en complément de valeurs limites plus classiques exprimées en L_{den} et L_{Amax}.

Tableau 25 : valeurs limites recommandées au Danemark pour le bruit basses fréquences de ferrys grandes vitesses à l'intérieur des logements

Zonage d'urbanisme	$L_{Aeq,2min,10\text{-}160Hz}$ (dBA) *
Logements, crèches, etc.	Soirée/nuit (18h00-7h00) : 25 dBA
	Jour (7h00-18h00) : 30 dBA
Pièces aux activités sensibles au bruit, salles de classe, bureaux	35 dBA
Autres pièces dans les bureaux	40 dBA

- * niveau de bruit pondéré A dans la bande de fréquence 10-160 Hz, mesuré sur une durée de 2 minutes, dans la pièce la plus exposée

3.3.3 Protection des travailleurs

▶ Nouvelle-Zélande

Le *New Zealand Occupational Safety and Health Service* (NZOSHS), instance chargée de la protection de la santé en milieu professionnel, préconise que le niveau de pression infrasonore soit inférieur à 120 dB(Lin), niveau global intégré dans la bande de fréquence de 1 à 16 Hz, pour 24 heures d'exposition (Chatillon 2006).

▶ Pologne

Un niveau d'exposition aux infrasons maximum pour une journée de travail a été fixé à 102 dBG pour les travailleurs en Pologne. La valeur de ce seuil est réduite pour les jeunes individus et les femmes enceintes. À cet indicateur moyenné s'ajoutent des seuils à respecter pour les bandes d'octave comprises entre 10 et 25 Hz (CIOP 2011 et Decret 2002).

3.3.4 Confort sonore à l'intérieur des bâtiments (Suède)

On distingue en Suède quatre classes acoustiques de bâtiments : A, B, C et D. Cette classification fait référence à deux normes : la norme SS 25267:2015 pour les logements et la norme SS 25268:2007 pour les autres types de bâtiments. Les exigences réglementaires du Code de la construction (*Boverkets byggregler*) s'appliquent à partir de la classe C (BBR 18–7 Bullerskydd), tandis que les classes A et B correspondent à un niveau d'exigences accrues.

Les niveaux de bruit à l'intérieur de logements exposés à des bruits d'équipement collectifs et à des sources de bruit extérieur (trafic et autres) sont donnés respectivement dans le Tableau 26 et le **Tableau 27**.

Tableau 26 : critères suédois de classification de confort sonore à l'intérieur des logements pour les bruits d'équipements collectifs

Type de locaux	Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
	L_{Aeq}	L_{AFmax}	L_{Aeq}	L_{AFmax}	L_{Aeq}	L_{AFmax}	L_{Aeq}	L_{AFmax}
Chambre à coucher, salle de séjour	22[1]	27	26[2]	31	30[3]	35	30	35
Autres locaux	31	36	35	40	35	40	35	40

[1] Autre exigence : $L_C \leq 42$ dB dans les chambres à coucher et les salles de repos.
[2]. Autre exigence : $L_C \leq 46$ dB dans les chambres à coucher et les salles de repos.
[3]. Autre exigence : $L_C \leq 50$ dB dans les chambres à coucher et les salles de repos. Des dépassements sont permis, mais dans la limite des niveaux par tiers d'octave précisés dans le Tableau 28 ci-dessous

Tableau 27 : critères suédois de classification de confort sonore à l'intérieur des logements pour les sources de bruit extérieur

Type de locaux	Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
	L_{Aeq}[1]	L_{AFmax}[2]	L_{Aeq}[1]	L_{AFmax}[2]	L_{Aeq}[1]	L_{AFmax}[2]	L_{Aeq}[1]	L_{AFmax}[2]
Chambre à coucher, salle de séjour	22	37	26	41	30	45	34	49
Cuisine, salle de bain	31	46	31	-	35	-	39	-

[1] : Pour le bruit de trafic, niveau équivalent $L_{Aeq, 24h}$
[2] : LAFmax : Niveau maximum sur la période de nuit 22h-6h, 3 dépassements autorisés par nuit.

Des courbes de référence sont également disponibles par type acoustique de logement.

Tableau 28 : niveaux équivalents (L_{eq} en dB) dans les chambres à coucher et les locaux de repos

Bandes de fréquence (Hz)	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Classe A	56	49	43	38	36	34	32	30	28
Classes B, C et D	56	49	43	41,5	40	38	36	34	32

3.3.5 Vibrations dans les bâtiments (Suède)

L'annexe B de la norme suédoise SS 4604861:1996 relative à l'évaluation du confort dans les constructions distingue trois registres de valeurs d'exposition aux vibrations : ceux en dessous desquels très peu de personnes ressentiront une gêne ; ceux pour lesquels un certain nombre de personnes ressentiront une gêne ; et ceux pour lesquels la plupart des personnes se déclareront gênées. Les valeurs guides consistent en des grandeurs efficaces (valeur moyenne quadratique) pondérées (constante de temps d'intégration *Slow*).

Tableau 29 : valeurs guides suédoises de confort dans les constructions pour les vibrations

Registre d'exposition aux vibrations	Gêne possible	Gêne probable
Maximum de la vitesse vibratoire efficace (en mm/s)	0,4 –1,0	> 1
Maximum de l'accélération vibratoire efficace (mm/s²)	14,4 – 36,0	> 36

- Source : norme SS 4604861:1996

En 2006, l'administration suédoise en charge du réseau ferroviaire et l'Agence suédoise de protection de l'environnement ont publié des recommandations relatives à l'exposition aux bruits et aux vibrations dus au trafic ferroviaire. Ces valeurs guides (vitesse vibratoire et accélération

vibratoire) sont elles aussi basées sur la norme SS 4604861:1996. Dans le Tableau 30, les valeurs guides (vitesse vibratoire) répertoriées correspondent à des objectifs à long terme tandis que les valeurs limites sont des valeurs limites à ne pas dépasser.

Tableau 30 : valeurs guides et valeurs limites suédoises pour les constructions au voisinage des infrastructures de transport ferroviaire

Type d'intervention sur l'infrastructure ferroviaire	Vitesse vibratoire (mm/s)		Accélération vibratoire (mm/s²)
Nouvelle infrastructure Valeurs pour les logements, hébergements de loisirs et établissements de santé	Valeur guide	0,4	14
	Valeur limite dans les chambres à coucher, période de nuit	0 ,7	
Modification significative Valeurs pour les chambres à coucher de logements, d'hébergements de loisirs et d'établissements de santé la nuit (22h00 à 6h00)	Valeur guide	0,4	14
	Valeur limite dans les chambres à coucher, période de nuit	1,0	
Infrastructure existante Valeurs pour les chambres à coucher de logements la nuit (22h00 à 6h00)	Valeur guide	1,0	14
	Valeur limite dans les chambres à coucher, période de nuit	2,5	

- Source : norme SS 4604861:1996

3.3.6 Bruits ferroviaires rayonnés par les structures (bruits solidiens, Suède)

Il n'existe en Suède aucun référentiel réglementaire national relatif aux bruits rayonnés par les structures (bruits solidiens). Tout au plus ce type d'émission est-il mentionné dans les « Recommandations suédoises sur le trafic ferroviaire » (*Banverket* et *Naturvårdsverket* 2006). En revanche, des études d'impacts de projets ferroviaires comportant des tunnels se sont référées aux valeurs guides (en conditions opérationnelles) telles que celles présentées dans le tableau suivant (projet de tunnel ferroviaire du Västlänken, Gothenburg, Suède).

Tableau 31 : valeurs guides suédoises pour les bruits solidiens rayonnés par les structures

Type de bâtiment	Niveau maximum L_{pASmax} (en dB)
Studio de télévision, studio d'enregistrement, salle de concert	25 - 30 (La composante basse fréquence et la sensibilité au bruit peuvent être évaluées au cas par cas)
Logement, établissement de soins, hôtel	30 (analyse en fréquences selon la norme SOFS 1997:7. Intervalles de mesure d'une durée de 5 minutes incluant les passages de trains les plus bruyants)
Musée, théâtre, école, crèche, église, bibliothèque, centre de congrès	35
Bureaux ou autres activités de jour	40

- Source : *Banverket* (2006), projet *Västlänken*

3.3.7 Bruit solidiens dus aux infrastructures ferroviaires (Suisse)

La Directive pour l'évaluation des vibrations et du bruit solidien des installations de transport sur rails (EVBSR, 20 décembre 1999) prévoit des valeurs guides pour le bruit solidien rayonné au voisinage des infrastructures de transport ferroviaire (voir Tableau 32).

Tableau 32 : valeurs guides suisse pour le bruit solidien ferroviaire à l'intérieur des locaux

	Valeurs de planification (nouveaux projets)		Valeurs indicatives d'immission (modifications d'infrastructures existantes)	
	LA_{eq} du niveau sonore à l'intérieur du local en dBA			
	Jour $L_{Aeq, 16h}$	Nuit $L_{Aeq, 1h}$	Jour $L_{Aeq, 16h}$	Nuit $L_{Aeq, 1h}$
Zones d'habitation, zones d'intérêt public (aires d'école, hôpitaux)	35	25	40	30
Zones mixtes, centre-ville, zones de village, zones agricoles, zones d'habitation déjà exposées	40	30	45	35

3.4 Analyse et synthèse des réglementations

En l'absence de Directive européenne spécifique au bruit des éoliennes ou aux infrasons et basses fréquences de toutes sources sonores, il n'existe pas actuellement d'harmonisation réglementaire en Union Européenne sur ces sujets. Seuls des réglementations ou référentiels nationaux sont actuellement disponibles. Parmi les référentiels nationaux qui prennent en compte l'exposition aux bruits basses fréquences, seuls quelques uns incluent des dispositions spécifiques aux parcs éoliens, à l'exception des pénalités pour tonalités marquées, lorsqu'elles sont présentes. Seul le Danemark a intégré officiellement la prise en compte des basses fréquences dans sa réglementation sur l'impact sonore des parcs éoliens. Mais les valeurs d'isolement prises pour le calcul des niveaux d'exposition aux basses fréquences sonores à l'intérieur des habitations sont controversées. En Australie, l'État de Nouvelle Galles du sud est sur le point d'adopter de nouvelles recommandations relatives aux conditions d'implantation des parcs éoliens, au sein desquelles figure un terme correctif conditionné par la présence de basses fréquences.

Les méthodes conventionnelles d'évaluation du bruit dans l'environnement sont basées sur des niveaux sonores exprimés en décibels pondérés A. Or, le filtre de la pondération A atténue l'importance des fréquences basses et hautes. Cette pondération sous-estime la gêne due aux bruits basse ou très basse fréquence, raison pour laquelle, dans les pays où des exigences ont été définies, les niveaux limites recommandés pour les bruits basses fréquences sont inférieurs aux niveaux limites pour les bruits courants (de 5 à 15 dB, selon les cas considérés).

La plupart des plaintes liées à des bruits basses fréquences correspondent à des situations d'exposition à l'intérieur des bâtiments. Certains pays ont développé des recommandations relatives à l'exposition aux bruits basses fréquences et aux infrasons à l'intérieur des habitations, le plus souvent au voisinage des installations industrielles, mais à ce jour, seuls l'Allemagne, le Danemark et Taïwan ont intégré la prise en compte de l'exposition aux bruits basses fréquences dans leur réglementation.

L'utilisation de valeurs guides uniques, moyennées sur toute la gamme des basses fréquences, se heurte au problème du masquage de certaines fréquences caractéristiques qui peuvent s'avérer gênantes. En complément des limites exprimées en niveaux équivalents large bande, certains pays ont émis des recommandations qui consistent à comparer les niveaux en tiers d'octave à des courbes de référence aux basses fréquences exprimées en seuils d'audition, de gêne ou de fatigue physique.

Pour identifier la présence de bruits basses fréquences, une pratique courante consiste à comparer les niveaux de pression acoustique mesurés avec les pondérations A et C. Dans plusieurs pays, dès lors que $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ est supérieur à 15 ou 20 dB, le bruit est considéré comme présentant une composante basse fréquence. Leventhall (Leventhall, Pelmear, et Benton 2003) suggère de considérer une différence de 20 dB, tandis que Broner (Broner 2010) estime, dans les cas où le niveau pondéré A est bas, qu'un écart plus élevé (25 dB) peut être considéré, sans risque de recrudescence des plaintes. Leventhall estime que cette différence $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ constitue

plus un indicateur de la présence d'un problème potentiel de basse fréquence, pouvant motiver ou non une analyse en fréquences sur la base des courbes de référence par bandes de tiers d'octaves mentionnées précédemment. Pour Jabben (Jabben et Verheijen 2012), en revanche, la capacité des courbes de référence à prévoir si, effectivement, un bruit basse fréquence présente un caractère gênant ou non, reste limitée.

4 Génération et propagation du bruit des éoliennes

4.1 Bruit des éoliennes : de la source de bruit à l'exposition des personnes

L'exposition sonore d'une personne à proximité d'une éolienne dépend de l'énergie sonore émise par l'éolienne, du bruit généré par son environnement proche (bruit de végétation par exemple), ainsi que de l'atténuation que l'onde sonore va subir au cours de sa propagation entre l'éolienne et la personne exposée (Figure 23).

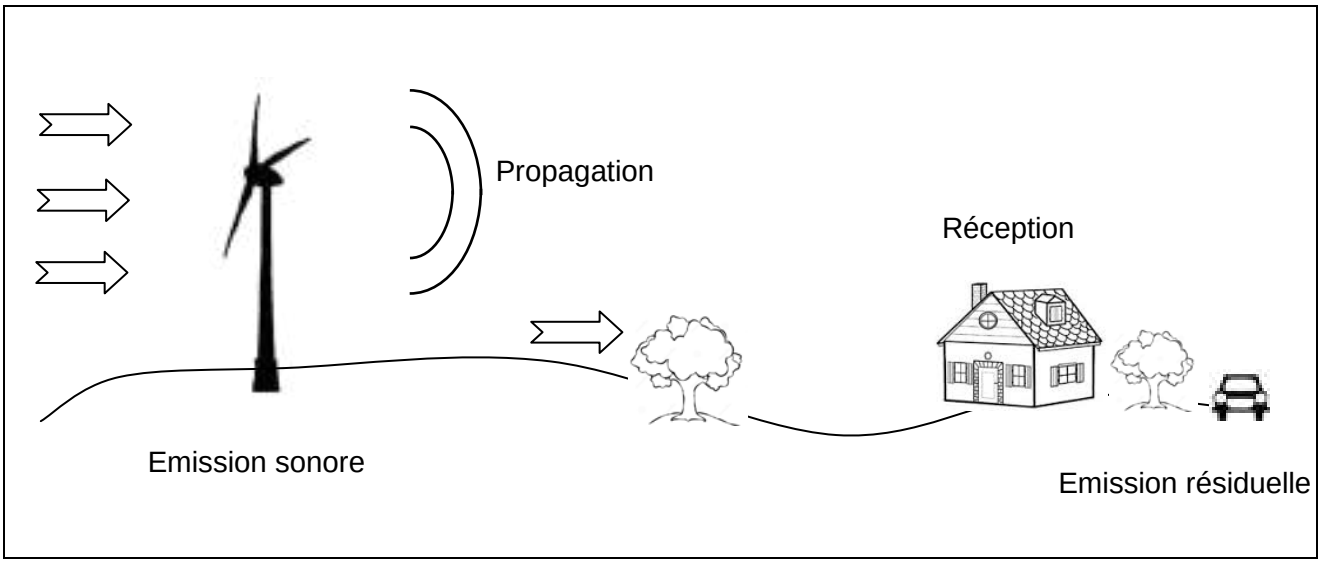


Figure 23 : de la source de bruit à l'exposition de l'environnement

La prévision ou l'estimation correcte du niveau d'exposition sonore d'un riverain d'éolienne (à l'intérieur et à l'extérieur des habitations) nécessite une bonne compréhension des phénomènes intervenant aussi bien au niveau de l'émission sonore, qu'au niveau de la propagation.

Concernant la source de bruit, il est important de connaitre la puissance sonore de chaque source ainsi que leur spectre fréquentiel (contenu de sons « graves » ou « aigus » présents dans le bruit émis). Il est également essentiel de connaitre les différents paramètres dont dépendent ces grandeurs (la vitesse ou la direction du vent par exemple pour les éoliennes).

Le bruit perçu résulte donc de la contribution du bruit de l'éolienne elle-même et de celle des autres sources de bruit (bruit de fond, encore appelé « bruit résiduel » au sens de la normalisation acoustique). Les émissions sonores des éoliennes varient au cours du temps et en fonction des vitesses de vent. Il est en de même pour le niveau de bruit de fond. Selon la zone dans laquelle se situe l'habitation, et selon l'environnement qui l'entoure (zone rurale, zone industrielle, proximité d'axes routiers, présence de végétation, etc.), les ambiances sonores peuvent varier de plusieurs dizaines de décibels. L'émergence (différence entre le niveau de bruit ambiant et le niveau de bruit résiduel), indicateur retenu par la réglementation française pour l'évaluation du bruit des éoliennes, peut donc être variable au cours du temps.

Les distances d'éloignement habituelles entre sources de bruit et riverains de parc éoliens sont supérieures à plusieurs centaines de mètres. Pour de telles distances, outre la décroissance « naturelle » du son en fonction de la distance, d'autres facteurs entrent en jeu dans la propagation

acoustique : absorption atmosphérique, effet de relief, effet de sol, conditions météorologiques. Beaucoup de ces phénomènes dépendent de la fréquence du son et sont de plus non linéaires. Les fréquences graves (basses fréquences) s'atténuent plus lentement que les fréquences aiguës (hautes fréquences) avec la distance. De plus, certains de ces phénomènes sont en interaction. Ainsi, par exemple, les conditions météorologiques peuvent modifier la direction de propagation de l'énergie sonore, ce qui peut entraîner un contournement du relief pouvant rendre dans certaines situations les éoliennes perceptibles acoustiquement bien que non visibles.

Certains des phénomènes imliqués dans la propagation acoustique sont stables au cours du temps, tandis que d'autres fluctuent à des échelles temporelles plus ou moins grandes Lors de l'évaluation de l'exposition sonore d'un site, il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes adaptées prenant en compte l'ensemble de ces phénomènes. Deux échelles temporelles sont communément considérées :

- l'échelle de court terme, la plus utilisée, permet d'identifier des événements particuliers. Elle est notamment appliquée pour valider les modèles théoriques. Elle va souvent de quelques minutes à plusieurs heures, suivant les phénomènes considérés ;
- l'échelle de long terme, à laquelle se réfèrent généralement les textes réglementaires auxquels sont associées des méthodes de calcul simplifiées dites d'« ingénierie ». Elle concerne généralement des périodes de plusieurs semaines à une année.

La difficulté majeure reste actuellement le passage du court terme au long terme, c'est à dire l'extrapolation de résultats (mesures, prévisions) évalués sur des périodes courtes à des résultats représentatifs de périodes beaucoup plus longues. Cette problématique se pose par exemple lorsque des mesures de contrôles sont demandées et que pour des raisons de temps et de coûts financiers ces mesures ne sont souvent réalisées que sur des périodes de court terme (de quelques jours à quelques semaines par exemple). La difficulté d'extrapolation de résultats de mesures de court terme à des prévisions de long-terme amène souvent à envisager des conditions « extrêmes », c'est à dire celles qui entrainent un niveau sonore le plus élevé au niveau des habitations, lors d'un calcul prévisionnel du bruit à l'aide de logiciels.

La variabilité des niveaux sonores nécessite une expertise approfondie afin de cerner le comportement des ambiances sonores dans le temps, en fonction des conditions de vent, des saisons, etc. Afin de simplifier cette expertise, la détermination d'un critère de distance minimale d'éloignement des éoliennes par rapport aux habitations a souvent été évoquée. Cependant, la seule considération d'un critère de distance ne permet pas de caractériser précisément l'exposition sonore dans l'environnement. Ce critère peut en effet entraîner, selon la distance considérée, une surestimation ou une sous-estimation de l'impact acoustique du projet dans la zone considérée.

4.2 Sources de bruit

Les principales informations qu'il est nécessaire de connaître pour prévoir correctement les émissions sonores d'un « objet » sont :

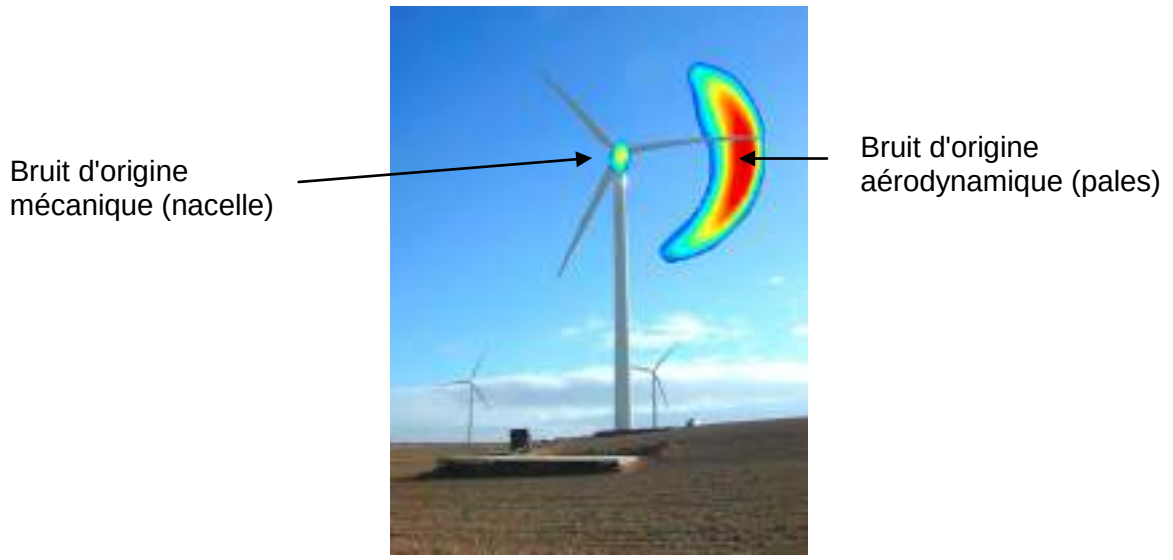
- le positionnement des principales sources de bruit constituant cet objet ;
- les caractéristiques fréquentielles de l'émission sonore résultant de chaque source ;
- la directivité de l'émission sonore de chaque source.

4.2.1 Sources de bruit d'une éolienne

Les éoliennes les plus courantes sont composées d'un rotor formé de pales, d'une nacelle renfermant toute la partie mécanique de la machine, et d'une tour sur laquelle est fixée la nacelle.

La majorité des éoliennes modernes implantées en Europe comportent trois pales fixées sur un axe horizontal, en amont de la nacelle et de la tour. D'autres modèles existent à deux pales, rotor en aval de la nacelle, certaines plus rares sont à axes vertical.

Le bruit d'une éolienne résulte de la contribution sonore de sources d'origine mécanique, localisées au niveau de la nacelle et de sources d'origine aérodynamique résultant du mouvement de l'air autour de chaque pale (Figure 24).



(Oerlemans, Sijtsma, et Méndez López 2007)

Figure 24 : visualisation des principales sources sonores d'une éolienne

4.2.1.1 Bruits d'origine mécanique

Le bruit mécanique provient du fonctionnement de tous les composants présents dans la nacelle. Les principaux composants générateurs de bruit sont le multiplicateur[49] (sauf pour certains modèles à transmission récente), les arbres, la génératrice, les équipements auxiliaires (systèmes hydrauliques, unités de refroidissement) (Figure 25).

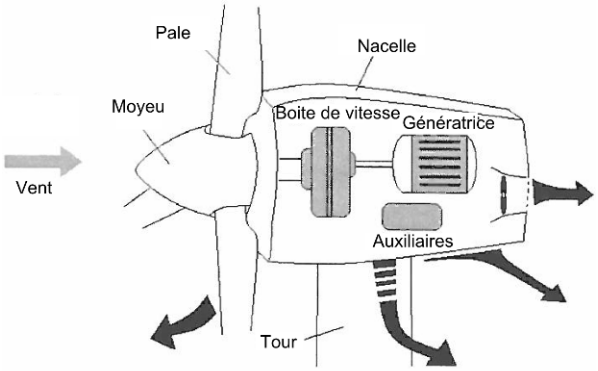
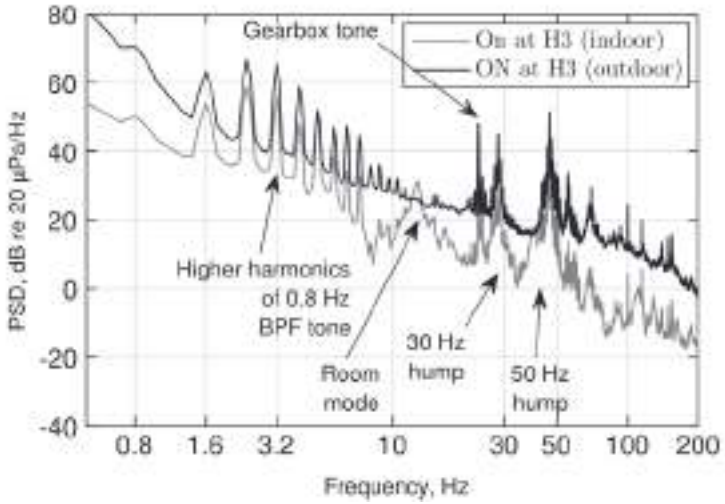


Figure 25 : principaux éléments mécaniques générateurs de bruit dans la nacelle

Note : adapté de (Fégeant 2001)

[49] Également appelé boite de vitesse ou encore boîte d'engrenages, le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice (source : http://eolienne.f4jr.org/multiplicateur, site consulté en juin 2016).

Le spectre du bruit émis est à large bande mais peut également contenir des composantes tonales basses fréquences dues aux parties tournantes, telles que le multiplicateur (boite de vitesse) par exemple, aux alentours de 20-30 Hz (Sawalhi et Randall 2014, Zajamšek *et al.* 2016). Certains éléments, comme les dispositifs de refroidissement, peuvent également émettre des sons basses fréquences.



Source : (Zajamšek *et al.* 2016)

Figure 26 : illustration de la présence de composantes tonales basses fréquences dues à la boite de vitesse (*Gear tone*).

Note : les composantes à plus basses fréquences (multiples de 0,8 Hz) sont dues au passage des pales.

Les premières générations d'éoliennes émettent un bruit d'origine mécanique qui peut être important. Cependant, les éoliennes modernes bénéficient de nombreuses améliorations qui permettent de réduire ce bruit. Ces améliorations ont porté sur le traitement acoustique de la nacelle : renforcement de l'isolation, mise en place de *silentblocs*, traitement des voies d'air par des silencieux, fabrication de multiplicateurs et de génératrices spécifiques. Pour les éoliennes modernes, la contribution du bruit d'origine mécanique est ainsi très inférieure à celle du bruit d'origine aérodynamique qui est désormais considéré comme la source principale du bruit émis par une éolienne.

4.2.1.2 Bruits d'origine aérodynamique

Tout obstacle placé dans un écoulement d'air émet du bruit. La tonalité de ce bruit dépend de la forme et des dimensions de l'obstacle ainsi que de la vitesse de l'écoulement. Plus l'obstacle est vif, plus la tonalité est marquée. L'écoulement d'air peut également faire vibrer les surfaces qui deviennent alors des sources de bruit.

Une pale d'éolienne a un profil proche de celui d'une aile d'aéronef (Figure 27) : l'air s'écoule autour de la pale à partir d'un bord épais (bord d'attaque) jusqu'à un bord plus fin (bord de fuite). Les écoulements complexes autour de ce profil sont à l'origine de bruits aérodynamiques dus à la présence de turbulences dont les origines sont diverses (cf. Figure 27). On distingue les turbulences présentes dans le flux d'air incident (vent) de celles engendrées par la pale elle-même.

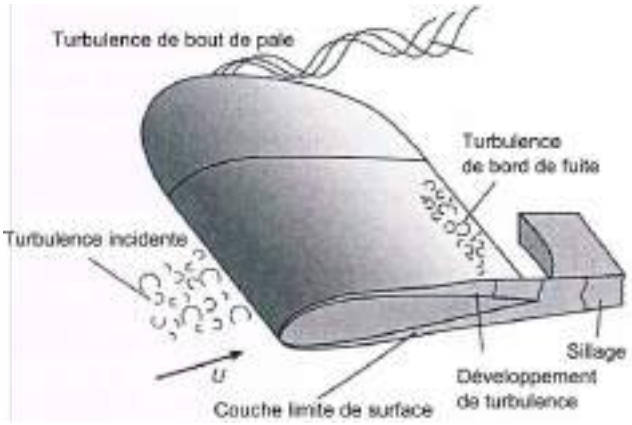


Figure 27 : écoulement d'air autour d'une pale d'éolienne

Note : adapté de (Wagner, Bareiß, et Guidati 1996))

- **Bruit dû à la turbulence présente dans le flux d'air incident (*inflow turbulence noise*)**

Le flux d'air incident (vent) est naturellement turbulent. Ces turbulences peuvent être d'origine atmosphérique et sont alors très liées aux conditions météorologiques, à la topologie et à la nature du terrain environnant. Elles peuvent également être créées par les perturbations générées par des obstacles environnants, parmi lesquelles peuvent se trouver d'autres éoliennes d'un parc. Ce bruit peut être très fluctuant au cours du temps. Sa caractérisation et sa contribution dans le bruit total est actuellement un sujet encore mal connu et fait l'objet de recherches.

- **Bruit dû aux turbulences de bout de pale (*tip noise*)**

Les différences de pression de l'air présentes en bout de pale créent des turbulences qui sont une cause de bruit. Cette contribution dépend de la forme du bout de la pale.

- **Bruit dû aux turbulences de bord de fuite (*trailing edge flow turbulence*)**

Le passage de l'air sur le côté intrados et extrados de la pale, ainsi que la jonction de ces deux écoulements au niveau du bord de fuite sont une source de turbulences dans le sillage de la pale, génératrice de bruit (*trailing edge flow turbulence*) (Figure 28a). Ces turbulences peuvent être amplifiées par des défauts de surface de la pale (trous, aspérités, salissures, fissures, etc.) ainsi que par des défauts de géométrie du bord de fuite (bord épais, abimé ou émoussé) (Figure 28b).

Ce bruit augmente avec la vitesse de l'écoulement et est ainsi prédominant aux extrémités de chaque pale. Lorsque l'angle d'incidence de la pale par rapport à l'écoulement est important, un décrochage de l'écoulement apparait et donne naissance à un bruit basse fréquence important dû à une vibration de l'ensemble de la pale (Figure 28c).

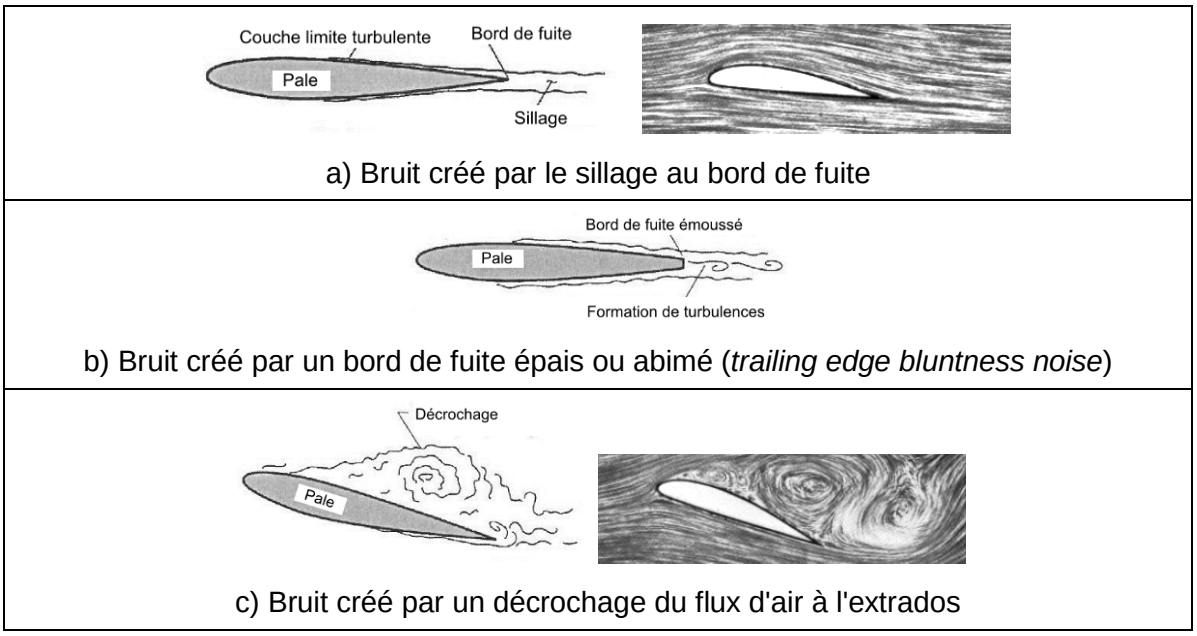
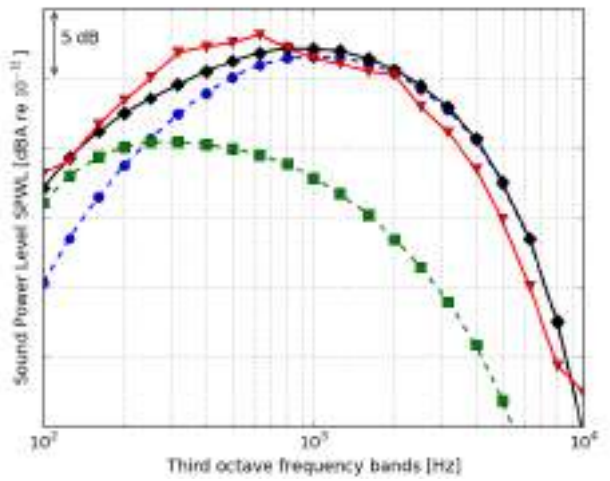
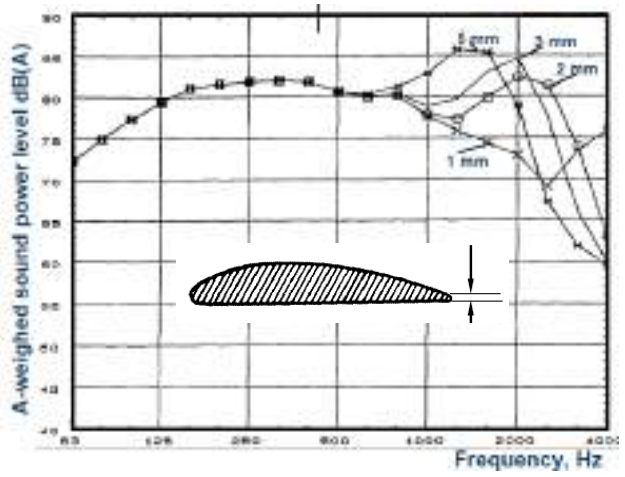


Figure 28 : principaux mécanismes de formation des turbulences génératrices de bruit

Les différents bruits aérodynamiques émettent à des fréquences différentes. La Figure 29 montre les contributions spectrales des principales sources de bruit aérodynamique et leur part dans le spectre total (Sinayoko 2015). La contribution de la turbulence du flux d'air incident (*inflow turbulence*) prédomine en basses fréquences, tandis que celle liée au bruit de bord de fuite prédomine aux fréquences plus élevées.



(Sinayoko 2015)



(Sinayoko, Azarpeyvand, et Lyu 2014)

Note : bruit de bord de fuite (cercles bleus), bruit de bord d'attaque (carrés verts), bruit total (modèle : losanges noirs, mesures : triangles rouges).

Figure 29 : contributions relatives des bruits aérodynamiques de pale au bruit total

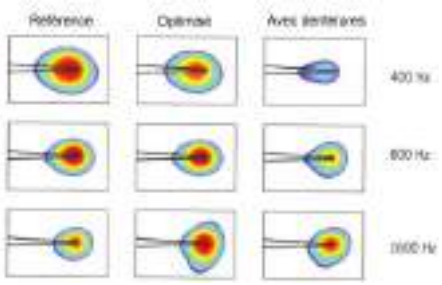
Sur une pale, les sources de bruit aérodynamique sont plutôt localisées sur le bord de fuite et en extrémité de pale. C'est dans cette partie que les vitesses d'écoulement sont les plus élevées. Les profils de pale ont donc évolué pour adopter une forme complexe.

Des programmes de recherche ont permis d'améliorer la productivité de la machine et de réduire également les émissions sonores. On peut citer par exemple l'utilisation de bandes rugueuses ou de dispositifs similaires tels que des petites ailettes placées sur certaines parties de la pale dans le

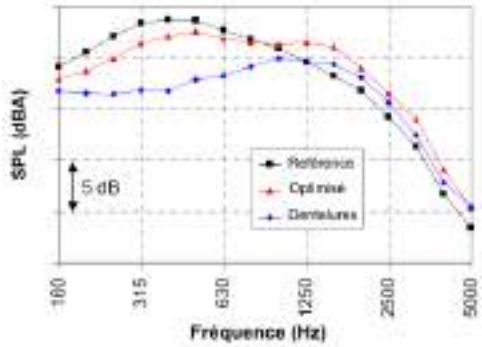
but de générer un léger courant d'air turbulent à la surface des pales. La disposition de ces bandes rugueuses est calculée de manière à assurer que la couche turbulente se dissolve au maximum lorsqu'elle atteint le bord de fuite de l'aile. Ces dispositifs permettent d'éviter le décrochage de l'écoulement d'air autour du profil de la pale. Ce décrochement a souvent lieu dans la zone où le profil de pale est encore épais. Les bandes rugueuses sont donc collées sur la face inférieure de la pale, près de la base, sur environ 1 m de longueur. Les gains constatés peuvent être appréciables. Sur un cas concret, il a été constaté une amélioration d'une dizaine de dBA sur la puissance acoustique de la machine.

Des dispositifs dentelés appelés « serrations » et placés au niveau du bord de fuite peuvent également apporter une atténuation significative de l'ordre de 3 à 5 dBA en basse fréquence. Ces dispositifs font actuellement l'objet d'études portant aussi bien sur l'optimisation de leur forme que sur la compréhension des phénomènes impliqués dans la réduction du bruit (Arce *et al.* 2015, Chong, Joseph, et Gruber 2013, Chong et Vathylakis 2015, Hurault *et al.* 2015, Sinayoko, Azarpeyvand, et Lyu 2014, Zhu et Shen 2015).

c) Dispositif de réduction du bruit dentelé (serrations)



b) Bruit aérodynamique du bord de fuite



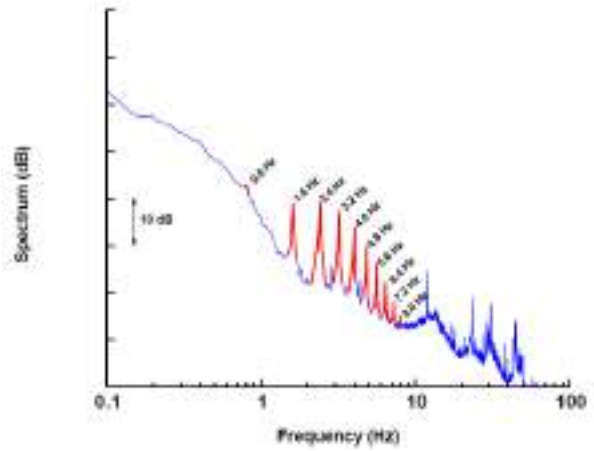
c) Efficacité de la réduction du bruit

Source : (Bowdler et Leventhall 2012)

Figure 30 : dispositif de réduction du bruit appelé « serrations »

Autres bruits d'origine aérodynamique

Le cisaillement du flux d'air situé entre les pales et la tour peut également être à l'origine de bruit. Ce bruit pouvait avoir une contribution importante sur les anciennes éoliennes dont le rotor était placé en aval de la tour par rapport à la direction de provenance du vent. Le positionnement du rotor en amont de la tour adopté sur les éoliennes modernes a fortement réduit cette contribution. Cette part est cependant toujours présente et se traduit par des pics dans la partie IBF du spectre, pics dont la fréquence correspond à la fréquence de passage des pales devant le mat (de l'ordre du Hz), et à ses harmoniques supérieures ((MG_Acoustics 2014b, a, Zajamšek *et al.* 2016). L'amplitude de ces pics reste cependant très inférieure au seuil d'audition pour les fréquences concernées.

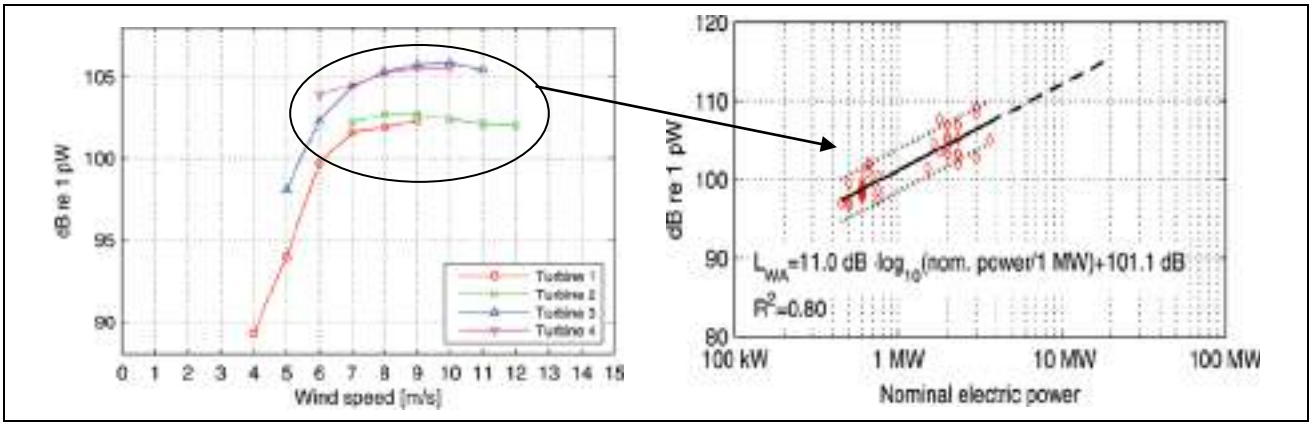


Source : (MG_Acoustics 2012)[50]

Figure 31 : exemple de spectre mesuré a 2,5 km de 4 éoliennes. Les pics rouges sont dus aux éoliennes. La ligne bleue est le bruit de fond du site

4.2.1.3 Emission sonore d'une éolienne

De nombreuses études (voir par exemple (Møller et Pedersen 2011)) ont été menées pour mettre en relation la vitesse de l'écoulement sur les pales avec le bruit émis. Tous les autres paramètres restant égaux, la pression acoustique augmente très rapidement avec la vitesse de la pale par rapport à l'écoulement d'air autour de la pale (Bowdler et Leventhall 2012) (suivant la taille des turbulences par rapport à la pale). La puissance acoustique totale d'une éolienne croit avec la vitesse du vent jusqu'à atteindre un palier dont la valeur dépend de la puissance électrique nominale de la machine de façon quasi linéaire (Figure 32).



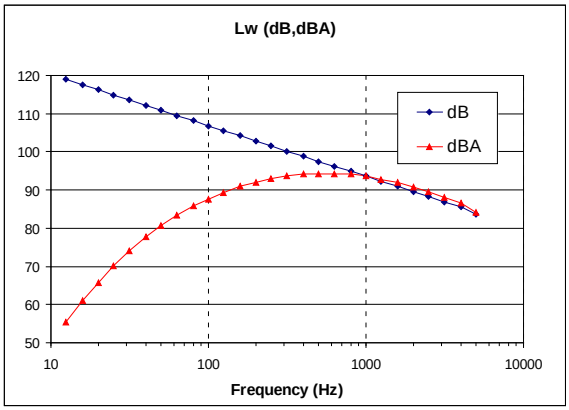
Source ; (Møller et Pedersen 2011)

Figure 32 : exemples de puissance acoustique d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent (gauche) et de sa puissance électrique nominale (droite)

Si l'on excepte la présence possible de pics dans la partie très basse fréquence (quelques Hz), dus aux composants mécaniques ou au passage des pales devant le mat (voir § 0 et § 4.2.1.2), le

[50] description du document disponible sur le site http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/noise-bruit/turbine-eoliennes/information-renseignements-eng.php, rapport disponible dans son intégralité auprès de Santé Canada ccrpb-pcrpcc@hc-sc.gc.ca

spectre d'émission d'une éolienne est proche de celui d'un bruit rose[51], mais en suivant toutefois une décroissance de l'ordre de -4 dB/octave (Figure 33). Une éolienne constitue ainsi une source de bruit où les basses fréquences et infrasons prédominent.



Source : (Møller et Pedersen 2011)

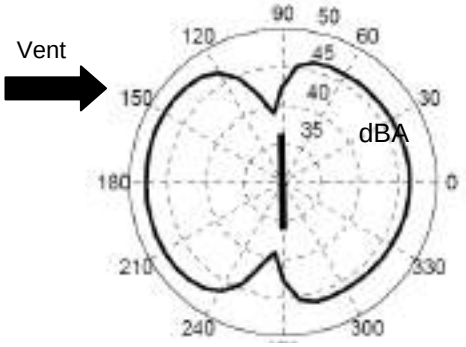
Figure 33 : exemple de la forme du spectre de puissance d'une éolienne (puissance électrique nominale 2 MW)

4.2.1.4 Directivité de l'émission sonore d'une éolienne

Une source sonore n'émet en général pas son énergie de manière uniforme dans toutes les directions. Ce phénomène est caractérisé par la notion de directivité qui est très dépendante de la fréquence de l'onde émise : elle est en générale plus marquée en haute fréquence et plutôt uniforme (source omnidirectionnelle) en basse fréquence.

Bien que chaque éolienne soit généralement considérée comme une source omnidirectionnelle dans les études d'impact traditionnellement rencontrées, les expériences et la théorie (Oerlemans 2009, Tian et Cotté 2015) montrent qu'une directivité horizontale significative peut être observée autour de l'éolienne (Figure 34). Cette directivité peut entrainer des niveaux sonores inférieurs de plusieurs dBA pour un riverain placé dans le plan du rotor par rapport à un riverain placé devant ou derrière le rotor. Dans le domaine des basses fréquences, en l'absence de données documentées à l'heure actuelle, il est raisonnable de considérer l'éolienne comme une source omnidirectionnelle.

[51] un bruit rose est un bruit qui possède la même énergie dans toutes les bandes d'octave. Pour les fréquences croissantes, les niveaux sont décroissants à raison de 3 dB/octave



Source : (Tian et Cotté 2015)

Figure 34 : exemple de directivité horizontale d'une éolienne (niveau sonore global moyenné sur plusieurs révolutions de rotor)

4.2.2 Sources de bruit de l'environnement, niveaux sonores résiduels, masquage

Au-delà des niveaux de bruit des éoliennes, il est nécessaire de prendre en considération les niveaux sonores résiduels à proximité des habitations riveraines.

Les niveaux sonores résiduels peuvent varier en fonction de la vitesse du vent (bruit du vent dans la végétation pas exemple), ou de sa direction (contribution sonore plus ou moins forte de sources de bruit environnantes telles qu'une route, une industrie, etc.). Mais le vent n'est pas le seul facteur de variation. Les activités humaines, la faune, le type de végétation et le relief sont d'autres paramètres importants dans l'évolution du bruit de fond.

Toutes ces sources de bruit environnantes varient au cours du temps. Leurs contributions peuvent, par leur intensité et ou par leur signature fréquentielle, masquer totalement ou partiellement le bruit des éoliennes. On parle de masquage total quand le bruit d'une source ne peut plus être identifié dans le bruit total.

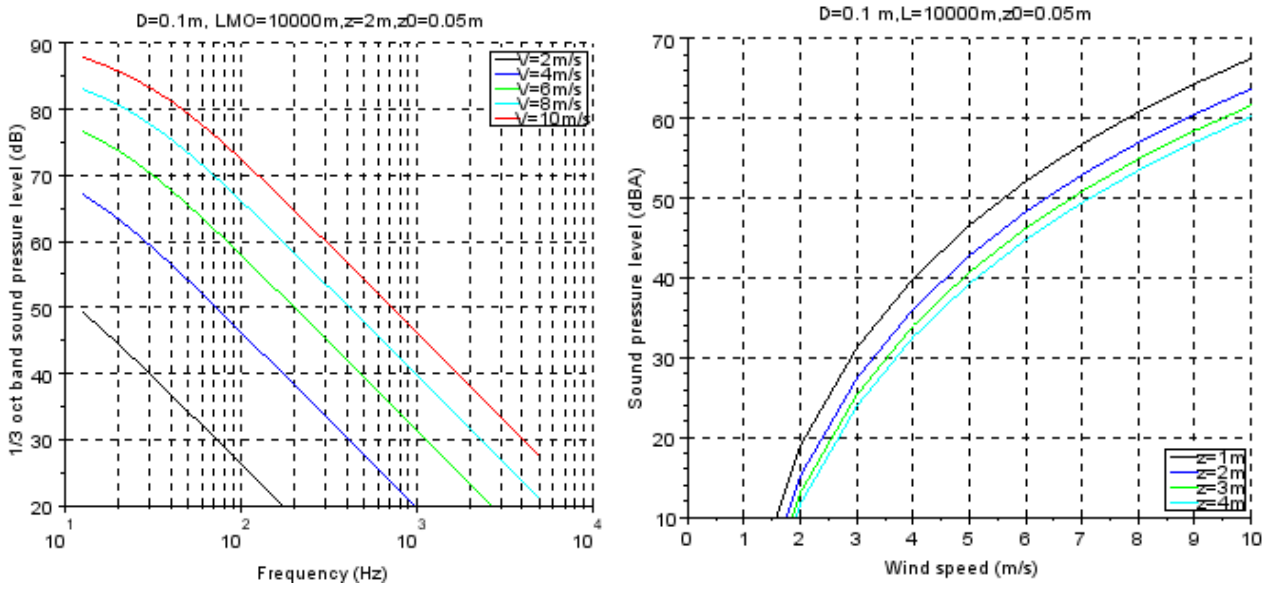
4.2.2.1 Le bruit des activités humaines

Les bruits liés à l'activité humaine sont multiples : bruit routier, activités agricoles (labours, moissons, élevages, etc.), sites industriels, etc. Ces bruits ont généralement des cycles de variation journaliers. Une forte augmentation est souvent visible le matin entre 6 et 9 heures ce qui correspond généralement aux déplacements des personnes, puis une stabilisation sur toute la journée et une diminution importante entre 18 et 20 heures. La nuit, ces activités sont généralement faibles. Des variations plus particulières sont possibles en fonction des activités locales ou de la « ruralité » de la zone. Par ailleurs, on note des décalages dans la reprise ou la diminution des activités selon la saison. Parmi ces activités, des études ont montré que le bruit routier était peu efficace pour masquer le bruit des éoliennes (Pedersen et van den Berg 2010, Pedersen *et al.* 2010, Van Renterghem *et al.* 2013), excepté lorsque ce dernier est faible (inférieur à 35-40 dBA) et lorsque la contribution du bruit routier est de 20 dBA supérieure à celle du bruit des éoliennes. Ceci peut s'expliquer par les structures temporelles différentes entre ces deux sources qui rendent l'éolienne davantage perceptible (Pedersen et van den Berg 2010, Pedersen *et al.* 2010).

4.2.2.2 Le bruit du vent

L'interaction du vent avec le dispositif de réception (microphone, écran anti-vent, ou oreille externe) génère un bruit qui peut s'ajouter au bruit d'une source sonore. Ce bruit additionnel est parfois appelé « pseudo bruit » (Fégeant 2001) dans la mesure où il ne s'agit pas d'un bruit réellement présent dans l'air environnant mais d'un bruit créé uniquement au moment de

l'interaction entre le vent et le dispositif de réception (microphone de mesure, pavillon de l'oreille externe, etc.). Le bruit du vent a un spectre riche en basses fréquences et son niveau sonore augmente avec la vitesse du vent (cf. Figure 35). Si la vitesse du vent au niveau du récepteur est faible ou si la contribution sonore de l'éolienne prédomine nettement sur celle du vent, cet effet est négligeable. En pratique, le bruit du vent masque difficilement le bruit des éoliennes car les éoliennes actuelles peuvent fonctionner avec des vitesses de vent faibles au niveau du sol (Pedersen and Persson Waye 2004). De même, le spectre du bruit du vent ne se superpose pas complètement à celui d'une éolienne, laissant ainsi des possibilités de masquage peu efficaces (Fégeant 2001).



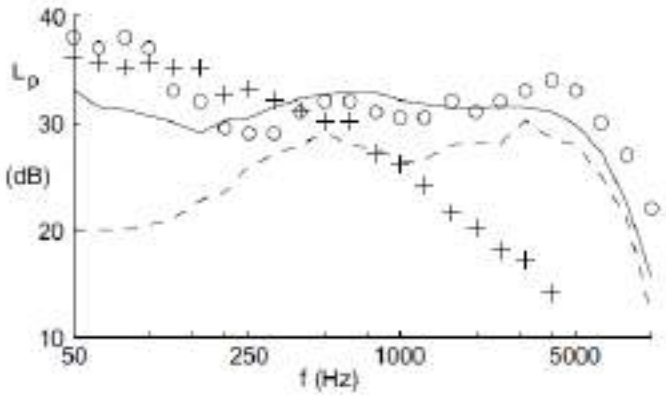
Gauche : spectre pour un microphone à 2 m de haut; droite : niveau global pondéré A en fonction de la hauteur du microphone (Ecotière 2012, van den Berg 2006)

Figure 35 : niveau sonore du bruit du vent au niveau d'un microphone équipé d'une protection anti-vent, en fonction de la vitesse du vent

4.2.2.3 Le bruit de la végétation

La végétation et les branches agitées par le vent produisent du bruit. Ce type de bruit est fonction du type de l'espèce présente sur le site. En période hivernale, pour des arbres à feuilles caduques, le bruit du vent est moins significatif. La taille des arbres est également très importante, car compte tenu des gradients de vent, plus près du sol, les arbres de petites tailles reçoivent moins de vent. Par ailleurs, la présence de végétation favorise la présence d'oiseaux et d'insectes et donc contribue à renforcer le chorus matinal (bruit dû au « réveil » de la faune, en particulier des oiseaux, avant le lever du soleil).

Le bruit du vent dans la végétation peut induire des composantes tonales, générées par les petits éléments de l'arbre (aiguilles de conifères, petites branches), et du bruit haute ou moyenne fréquence. Il possède également un contenu basse fréquence significatif (Bolin 2009, Fégeant 2001). Une comparaison avec le spectre d'une éolienne (Figure 36) montre qu'un masquage du bruit d'une éolienne par le bruit de la végétation peut avoir lieu pour les moyennes et hautes fréquences, mais est peu efficace pour les basses fréquences (Bolin 2009).



((---) modèle de Fégeant (Fégeant 2001), (—) modèle de Bolin (Bolin 2009), (o) mesures), et (+) celui d'une éolienne de 2 MW (Bolin 2009)

Figure 36 : comparaison entre le niveau sonore du bruit du vent (V=4,4 m/s) dans des peupliers

4.2.2.4 Les bruits de la faune

Les bruits de la faune concernent les chants des oiseaux, des insectes (grillons, cigales), des grenouilles, etc. Ces bruits peuvent devenir importants selon les moments de la journée et de la saison. En début de journée, le chorus matinal (essentiellement des oiseaux) augmente considérablement les ambiances sonores sur une durée limitée au lever du soleil. Ce chorus est moins important l'hiver qu'au printemps et en été. De même, les chants des grillons et grenouilles augmentent les niveaux sonores de nuit pour certains mois d'été. L'intensité des chants est variable selon le moment de la nuit et la température.

Ces chants influent de manière importante sur les niveaux sonores en dBA (variation d'une dizaine de dBA ou plus) mais leur fréquence d'émission ne concerne que les hautes fréquences (au-delà de 2 000 Hz) et ne masquent pas les basses fréquences.

4.2.2.5 Exemples numériques de sources de bruit basse fréquence dans l'environnement

Une étude australienne (Evans *et al* 2013) a montré que des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores équivalents ou supérieurs à ceux dus aux éoliennes pouvaient être courants aussi bien en milieu urbain (60 à 70 dBG), qu'en milieu rural (40 à 70 dBG), indépendamment de la présence d'éoliennes. En milieu urbain, ce sont essentiellement les activités humaines qui seraient à l'origine de ce bruit, avec une hausse moyenne de 10 dBG le jour par rapport à la nuit. Le bruit des transports peut par exemple être une source d'IBF (Dutilleux 2011). En milieu rural, le vent serait une des sources principales d'IBF (jusqu'à 50 à 70 dBG pour les vents forts). Cette étude indique également que les niveaux sonores d'infrasons et basses fréquences sonores relevés chez des riverains d'éoliennes ne sont pas supérieurs aux niveaux relevés en l'absence d'éolienne.

4.3 Propagation du bruit des éoliennes

La propagation des ondes sonores émises dans l'environnement est complexe et fait intervenir un grand nombre de phénomènes. Une bonne compréhension de la propagation impose de considérer différents effets qui sont présentés dans les paragraphes qui suivent. On considère les effets liés :

- au milieu de propagation (l'air), dans lequel interviennent :
- la divergence géométrique ;
- l'absorption moléculaire, dite absorption atmosphérique ;

- l'influence des profils verticaux de température et de vitesse du vent et l'influence de la turbulence atmosphérique, regroupés sous le vocable d'« effets météorologiques ».
- aux frontières du milieu de propagation (sols naturels ou artificiels, obstacles, bâtiments, etc.) :
- la réflexion sur les surfaces limites, dont le sol (on parle alors d'« effet de sol ») ;
- les divers phénomènes de diffraction dus à la topographie et/ou aux obstacles.

Suivant les positions relatives entre la source sonore et le récepteur, ces phénomènes ont plus ou moins d'impact sur la propagation sonore. Ainsi, les effets atmosphériques et les effets météorologiques ne sont significatifs – pour des conditions météorologiques non extrêmes représentatives de notre territoire – qu'à partir d'une distance de plusieurs centaines de mètres de la source En deçà, seuls la topographie, les obstacles et la nature des sols sont à prendre en compte. À distance égale, l'importance de l'effet météorologique décroit avec la hauteur de la source : à distance égale, cet effet est moins important pour une source éolienne que pour une source routière.

4.3.1 Niveaux de bruit et distance

Le niveau du bruit émis par une source dans un environnement extérieur homogène et sans obstacle décroit avec la distance. Le taux de décroissance dépend des dimensions de la source sonore : suivant la géométrie de la source et la distance à laquelle on se situe, une source de dimension finie peut être considérée soit comme une source surfacique (à faible distance), soit comme une source ponctuelle (à grande distance). Certaines sources étendues sont considérées comme des sources linéiques (route à fort trafic par exemple).

En atmosphère homogène et sans obstacle, l'atténuation des ondes sonores dépend essentiellement de la divergence géométrique et de l'effet de sol. Cependant, à des distances plus importantes, l'absorption atmosphérique et les effets météorologiques doivent en général être pris en compte.

4.3.1.1 Divergence géométrique

À l'image des ondulations qui se propagent à la surface de l'eau quand on y jette une pierre, une onde acoustique en espace libre se répartit sur une surface qui augmente à mesure qu'elle s'éloigne de la source, perdant ainsi de son énergie au cours de sa propagation. Ce phénomène est appelé divergence géométrique. Il dépend du type de source considéré (voir ci-dessous), mais ne dépend pas de la fréquence : les infrasons et basses fréquences sonores sont donc atténués de la même façon que les sons audibles par ce phénomène.

Lorsque l'on cherche à estimer le niveau sonore global d'une éolienne, l'ensemble des sources de bruit peut être assimilé à une seule source équivalente localisée au niveau du moyeu du rotor, dès lors que l'on se trouve à une distance supérieure au diamètre du rotor (Makarewicz 2011). Cette hypothèse de source ponctuelle unique pour une éolienne peut cependant ne pas être suffisante si l'on cherche à estimer le spectre sonore (Ecotière 2015) ; ceci concerne cependant assez peu les infrasons et basses fréquences sonores pour lesquels l'hypothèse de source ponctuelle semble raisonnable.

- **Cas d'une source ponctuelle**

La modélisation d'une éolienne par une source ponctuelle omnidirectionnelle localisée au centre du rotor est la plus courante.

Dans ces conditions, l'atténuation due à la divergence géométrique est donnée par l'expression :

$$Adiv = 10\log(\frac{Q}{4\pi d^2})$$

avec $Q = 1$ pour le cas d'une source omnidirectionnelle et *d* la distance en mètre entre le centre du rotor et le point de réception.

Dans le cas d'une source sonore omnidirectionnelle cohérente, la dispersion géométrique prévoit une atténuation sonore de 6 dB par doublement de distance.

- **Cas d'un parc éolien**

Un parc réel est habituellement modélisé à l'aide d'une distribution de sources ponctuelles localisées au niveau de la nacelle de chaque éolienne. L'implantation des machines et la position du récepteur par rapport à cette implantation sont importantes, car la décroissance ne sera pas la même selon, par exemple, que l'on est face à une ligne d'éoliennes ou en bout de ligne. En effet, la répartition des sources en ligne implique une occupation géométrique différente : depuis un point situé face à cette ligne, le parc sera vu comme une source linéique pour des distances d'éloignement faibles ou une longueur de ligne importante. Dans ces conditions, la forme de la surface d'onde formée par cette ligne s'apparente à une forme cylindrique et non sphérique et l'atténuation Adiv s'exprime alors sous la forme :

$$Adiv = 10\log(\frac{Q}{4\pi d})$$

En champ libre, cette expression conduit à une diminution de bruit égale à 3 dB par doublement de distance pour une source omnidirectionnelle.

Exemple

La Figure 37 permet de comparer la décroissance spatiale pour une éolienne unique (1 source ponctuelle) à celle d'un ensemble de 9 éoliennes en ligne (9 sources ponctuelles). On constate que le bruit d'une ligne d'éoliennes s'atténue moins vite que celui d'une éolienne unique.

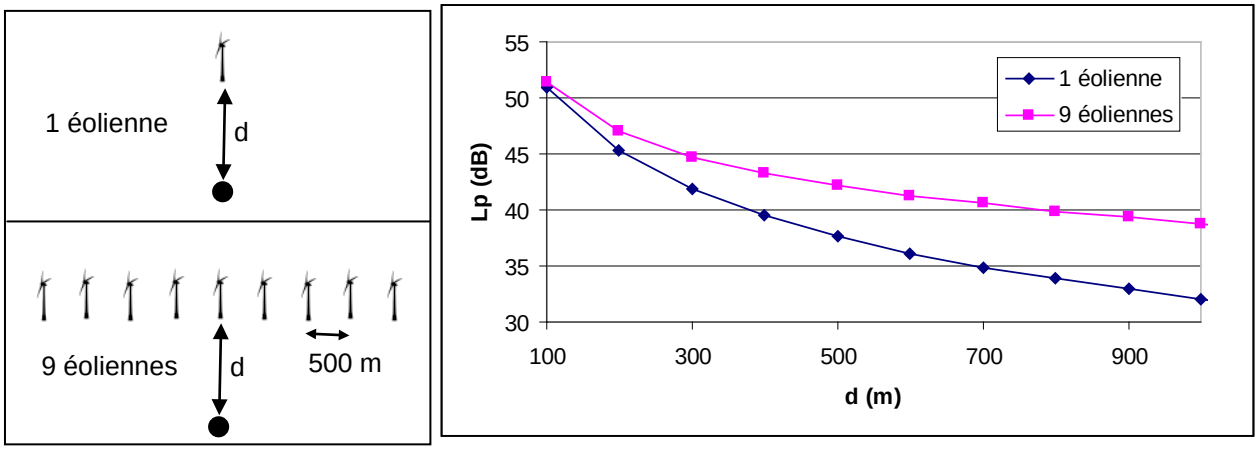


Figure 37 : décroissance spatiale pour une éolienne unique et pour une distribution de 9 éoliennes en ligne (hauteur de nacelle : 80 m, hauteur de récepteur : 2 m)

4.3.1.2 Absorption atmosphérique

À grande distance, divers processus liés aux propriétés des molécules composant l'air influencent l'atténuation des ondes sonores dans l'atmosphère. Cette atténuation varie en fonction de la fréquence du son, de l'hygrométrie et de la température (voir Figure 38). Pour des températures supérieures à 0°C, l'atténuation diminue avec l'augmentation de l'humidité relative et avec l'augmentation de la température. Au-dessus de 0°C, un air froid et sec transmet moins les bruits

de haute fréquence qu'un air chaud et humide. En dessous de 0°C, les tendances sont plus complexes à décrire. Les formulations ainsi que les tableaux de valeurs les plus utiles sont détaillés dans la norme internationale ISO 9613-1. On constate également (Figure 38) que les basses fréquences sont très peu atténuées avec la distance par le phénomène d'absorption atmosphérique, ce qui n'est pas le cas pour les fréquences supérieures à 1 000 Hz. Ceci explique en partie pourquoi il est difficile de percevoir des composantes hautes fréquences (supérieures à 4 kHz) du bruit d'une éolienne dès lors que l'on s'éloigne de quelques centaines de mètres de celle-ci.

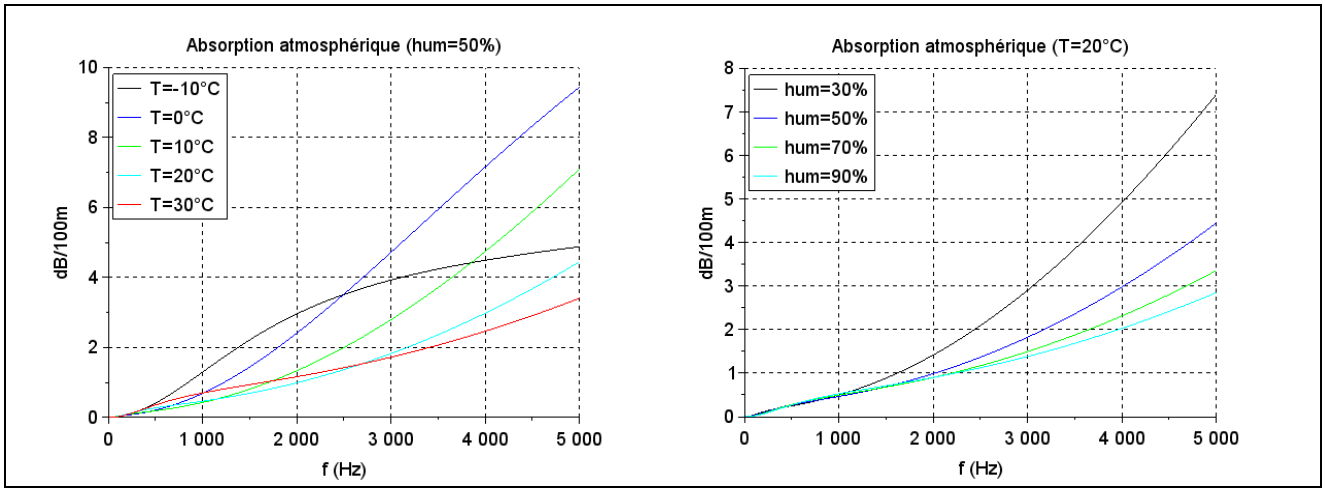


Figure 38 : atténuation (dB/100m) due à l'absorption atmosphérique en fonction de la température (gauche) et de l'humidité relative de l'air (droite)

4.3.1.3 Niveaux de bruit et conditions météorologiques

La propagation d'une onde acoustique peut être affectée par les conditions atmosphériques, en particulier celles du vent et de la température. Cet effet est appelé « effet météorologique » (Attenborough, Li, et Horoshenkov 2006, Gauvreau *et al.* 2009). Il dépend du comportement de l'atmosphère proche de la surface terrestre (jusqu'à une hauteur de quelques centaines de mètres). Les phénomènes qui apparaissent à ces altitudes présentent une interaction très forte avec le sol (topographie, température de surface et de sous-sol, hygrométrie, cultures, forêts, obstacles, bâti, etc.) et évoluent rapidement dans le temps et dans l'espace, ce qui rend leur description théorique et leur modélisation numérique complexe.

Les échanges de chaleur entre le sol et l'air ainsi que la présence d'un relief rugueux peuvent entrainer une variation importante de la température et du vent avec l'altitude. La vitesse du son dépendant de ces deux grandeurs, l'onde sonore va progresser dans un milieu où la vitesse du son n'est pas homogène et varie avec l'altitude. Ceci se traduit par une modification de la direction de propagation de l'énergie sonore et peut mener à trois conditions de propagation suivant le profil de vitesse du son résultant (Figure 39) :

- conditions de propagation homogènes : la vitesse du son est constante en fonction de l'altitude, les ondes sonores se propagent en ligne droite ;
- conditions de propagation favorables : la vitesse du son augmente avec l'altitude, l'énergie sonore est rabattue vers le sol, les niveaux sonores sont renforcés au niveau du sol ;
- conditions de propagation défavorables : la vitesse du son diminue avec l'altitude, l'énergie sonore est déviée vers le ciel, les niveaux sonores sont atténués au niveau du sol.

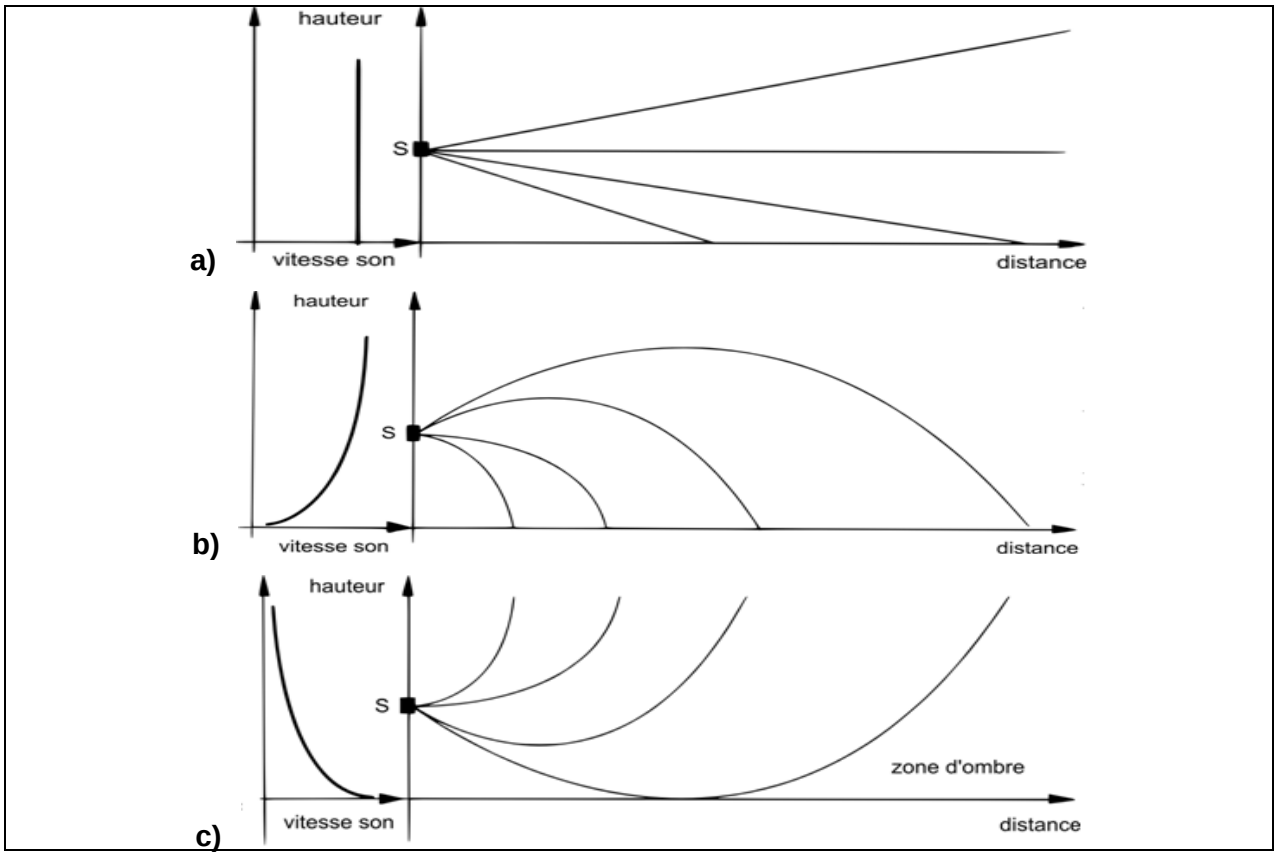
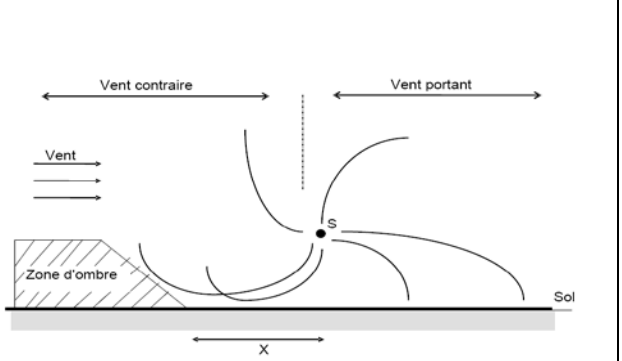


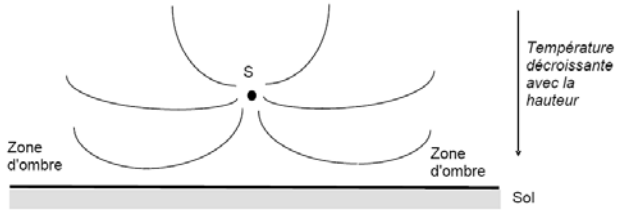
Figure 39 : conditions homogènes (a), favorables (b), et défavorables (c) à la propagation acoustique

Certaines conditions particulières de vent ou de température mènent à ce type de comportement : un vent portant ou une température qui croit avec l'altitude (nuit avec ciel dégagé par exemple) renforce les niveaux sonores et rend des sources lointaines plus audibles, tandis qu'un vent contraire ou une température qui décroit avec l'altitude (journée ensoleillée avec ciel dégagé par exemple) atténue les niveaux sonores (Figure 40). Des conditions réelles de propagation résultent d'une combinaison de ce type de comportement.

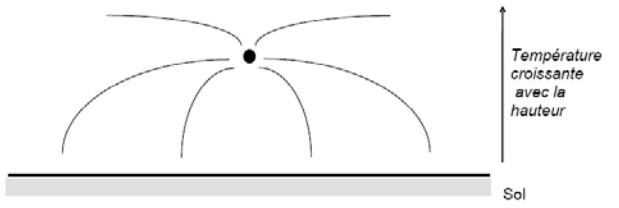


Vent portant : conditions favorables

Vent contraire : conditions défavorables



Conditions défavorables



Conditions favorables

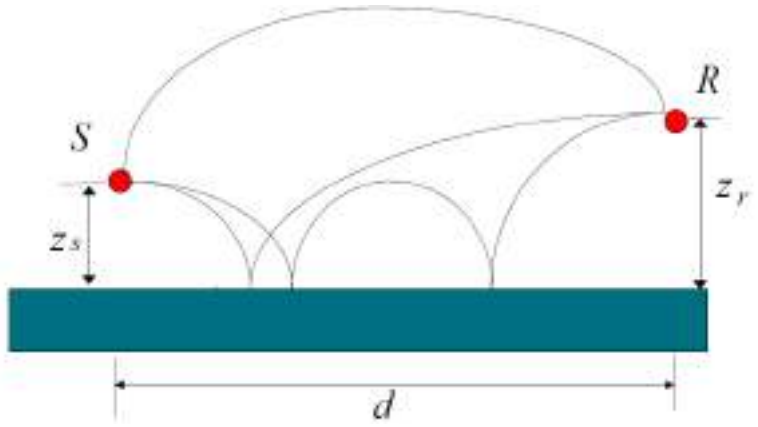
Figure 40 : influence du vent, pour une température homogène (gauche) et influence de la température, en l'absence de vent (droite), sur la propagation du son

Les effets météorologiques sont d'autant plus complexes à prendre en compte qu'il faut y ajouter l'influence des turbulences thermiques ou aérodynamiques, ainsi que la variabilité de ces phénomènes suivant le relief, le type de sol ou la végétation.

Les effets météorologiques peuvent avoir un impact important sur les niveaux sonores à grande distance. Cet impact dépend de la hauteur de la source : si les variations des niveaux sonores à un endroit précis peuvent atteindre la dizaine de dBA lorsque la source est proche du sol (cas du bruit routier par exemple où les variations des niveaux sonores peuvent atteindre plus de 10 dBA), ils sont moins importants lorsque la source est élevée comme c'est le cas pour des éoliennes (variations des niveaux sonores inférieures à 10 dBA). Sur le terrain, il est facile de constater l'influence des conditions météorologiques sur la propagation sonore (bruit lointain d'un train plus ou moins bien perçu selon la direction du vent). Mais, si les phénomènes sont connus et modélisés sur des espaces « maîtrisés », les irrégularités de relief, les variations de nature des sols (forêts, cultures, labours, infrastructures), rendent ces variations difficilement modélisables en grandeur réelle. Etablir des lois précises apparaît très délicat car il est impossible d'isoler les effets de l'hétérogénéité de l'atmosphère ou les effets dus aux turbulences de l'air qui sont constamment variables.

Indépendamment des effets de leurs gradients verticaux, la température et la vitesse du vent fluctuent rapidement autour de leurs valeurs moyennes. Il en résulte des fluctuations aléatoires de phase et d'amplitude de l'onde sonore et ainsi, une déformation des fronts d'ondes. Ces effets sont appelés communément « turbulence atmosphérique ». La conséquence principale de cette turbulence est, d'une part, la décorrélation des signaux acoustiques au cours de leur propagation et, d'autre part, la diffusion de l'énergie acoustique à l'intérieur des zones d'ombre atmosphérique ou topographique.

En conditions de propagation favorables, à partir d'une certaine distance d'une source ponctuelle, les effets météorologiques peuvent être responsables d'une décroissance moins rapide des niveaux sonores des infrasons et basses fréquences sonores avec la distance, passant ainsi d'une décroissance en -6 dB par doublement de distance, à une décroissance en -3 dB (Hansen, Hansen, et Zajamšek 2015, Makarewicz 2016). Ceci s'explique à la fois par la formation de rebonds multiples de l'énergie sonore rabattue vers le sol par ces conditions de propagation (voir Figure 41), et par le fait que les IBF sont très peu absorbés par le sol lors de chaque rebond (voir § 4.3.2.1). Il s'ensuit ainsi un renforcement de l'énergie sonore au niveau du sol et une diminution de la décroissance des niveaux sonores avec la distance. Ce phénomène dépend de la hauteur de la source et n'existe pour les éoliennes qu'au delà de 1 à 2 km.



Source : adapté de (Bérengier *et al.* 2012)

Figure 41 : illustration de la présence de rebonds multiples lors de conditions favorables à la propagation

4.3.2 Niveaux de bruit et caractéristiques de terrain

Les caractéristiques du terrain influençant la propagation des ondes sonores sont principalement reliées à la nature et à la topographie du sol.

4.3.2.1 Influence de la nature du sol ou « effet de sol »

Quelles que soient la nature et la composition des sols entre la source et le récepteur, homogène ou discontinue, leur influence respective sur l'atténuation de l'onde sonore le long du champ de propagation est importante. Cette atténuation dépend à la fois de la fréquence et de l'incidence de l'onde sonore par rapport au sol. L'atténuation est d'autant plus importante que l'onde sonore est rasante et que la fréquence est élevée. Cette règle générale s'applique bien aux sols absorbants naturels.

Dans le cas d'un sol et d'une atmosphère homogènes, le champ sonore est décomposé en trois termes (Figure 42) :

- une onde directe entre la source et le récepteur ;
- une onde réfléchie sur le sol entre la source et le récepteur ;
- une onde de surface.

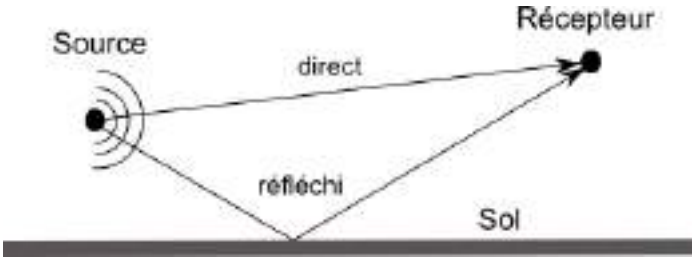
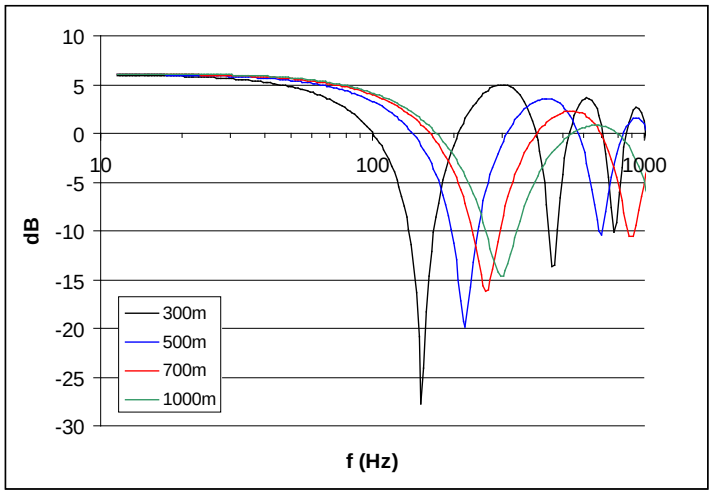


Figure 42 : influence du sol sur la propagation des ondes sonores

L'effet de sol est le résultat de l'interférence entre l'onde sonore réfléchie par la surface du sol et l'onde sonore qui se propage directement entre la source et le récepteur. L'absorption d'énergie qui peut avoir lieu lors de la réflexion de l'onde sonore sur le sol, lorsque ce dernier est absorbant, intervient également dans l'effet de sol. Cet effet est d'autant plus important que le sol est poreux et que la hauteur entre le rayon sonore et le sol est faible (propagation rasante).

L'effet de sol se traduit par la formation d'interférences entre une source et un récepteur : les niveaux sonores sont plus ou moins atténués suivant la distance et suivant les fréquences. La Figure 43 illustre cet effet en présentant l'augmentation de niveau sonore qu'apporte l'effet de sol, par rapport à une situation de champ libre (sans sol), pour une configuration classique d'une éolienne sur un sol horizontal. Lorsque l'on s'éloigne de la source, les interférences se déplacent vers des fréquences plus élevées et sont moins marquées.

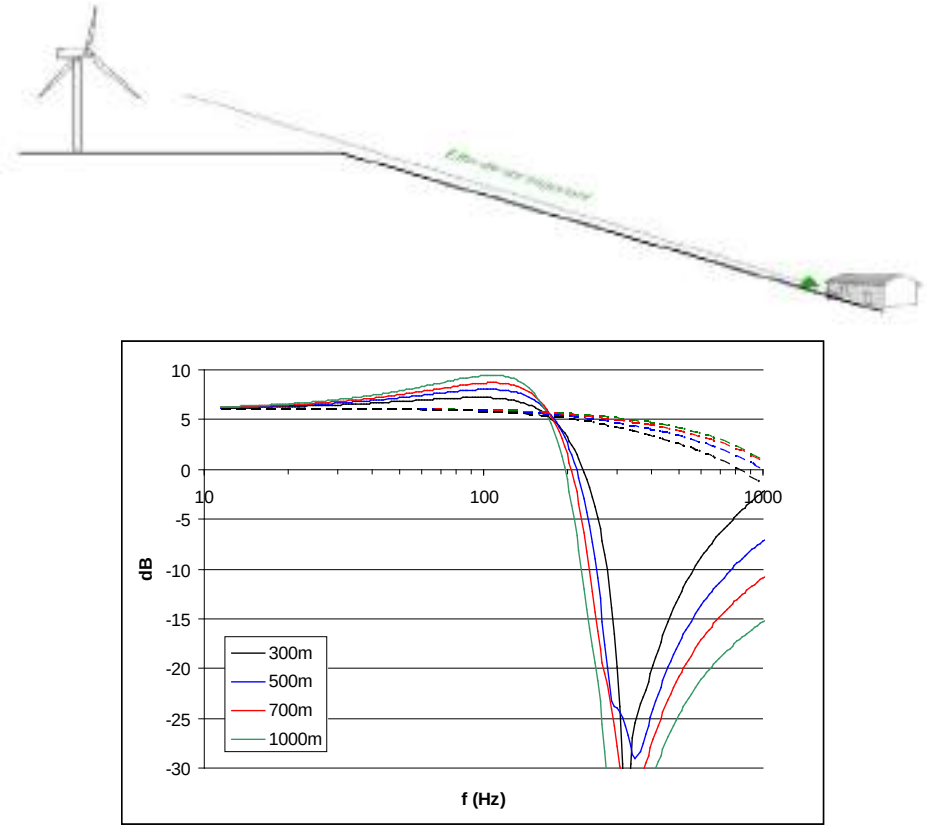
Pour les basses fréquences (< 50 Hz), ce phénomène d'interférences n'existe plus dès lors que l'on se situe à plus de 500 m environ de l'éolienne. Pour ces fréquences, le sol se comporte comme un sol rigide quelle que soit la fréquence.



hauteur de source : 80 m, hauteur de récepteur : 2 m, sol herbeux partiellement absorbant

Figure 43 : niveau sonore additionnel dû à l'effet de sol

Sur un sol accidenté, la hauteur apparente de la source, vue du récepteur, peut être beaucoup plus faible que la hauteur réelle, et l'onde sonore devient plus rasante par rapport au sol. Pour les basses fréquences (< 50 Hz), l'effet de sol en conditions rasantes peut entraîner des variations de niveau sonore de quelques dB suivant la distance (Figure 44). En dessous de 20 Hz, cet effet n'est plus visible.



Traits pleins : sol herbeux partiellement absorbant, tirets : sol réfléchissant ; hauteur apparente de source : 5 m

Figure 44 : influence de l'effet de sol sur sol accidenté

4.3.2.2 Influence de la végétation

Des études expérimentales (Barrière 1999) ont montré qu'une végétation importante aux abords d'une infrastructure routière ou ferroviaire induit une atténuation du bruit non négligeable pour les riverains.

Trois effets principaux de la forêt sur le bruit sont ainsi isolés :

- l'atténuation du bruit par le sol de la forêt ;
- la diffusion par les troncs, les branches et les feuillages ;
- l'effet de la modification des profils météorologiques dans la forêt et au-dessus de la forêt.

Ces trois effets ne peuvent être significatifs, dans le cas des éoliennes, que lorsque l'éolienne, vue d'un riverain, est située très basse, voire en dessous de la hauteur d'un couvert forestier (Figure 45). Cette situation peut se rencontrer losqu'un projet éolien est situé par exemple sur une crête, et qu'une forêt se situe sur les flancs d'une colline jusqu'à des habitations en contre bas.

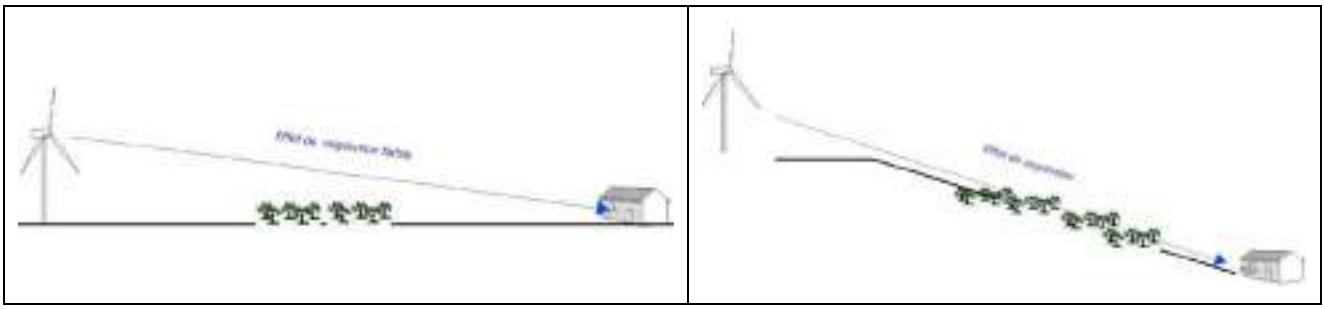
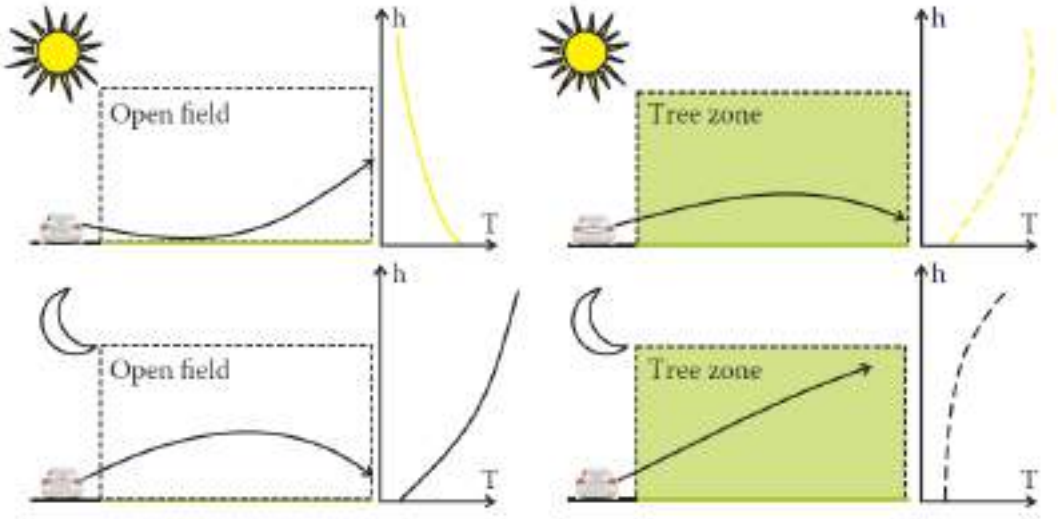


Figure 45 : influence de l'effet de végétation lorsque la source apparente est haute (à gauche : effet négligeable) et basse (à droite : effet possible)

Lorsque l'on se situe en incidence rasante comme décrit ci-dessus, la nature très absorbante d'un sol forestier peut contribuer à l'effet de sol décrit au paragraphe 4.3.2.1. Dans le cas des infrasons et basses fréquences sonores, l'effet de la diffusion par les troncs, les branches et les feuillages est toujours négligeable, car ces éléments sont de trop petite taille par rapport aux longueurs d'ondes condidérées (qui vont typiquement de 6 m pour 50 Hz à plus de 300 m pour 1 Hz). Les études mentionnées précédemment (Barrière 1999) suggèrent que c'est essentiellement la modification locale des effets météorologiques qui peut être responsable d'une modification de la propagation acoustique. Cette modification est complexe, car suivant les conditions météorologiques, elle peut se traduire soit par une atténuation, soit par une augmentation des niveaux sonores. La Figure 46 présente une illustration de cet effet en fonction des modifications de la température induites par la présence d'une forêt.



Note : schéma extrait de (Nilsson, Bengtsson, et Kl\a eboe 2014)

Figure 46 : exemple de modification de la propagation acoustique due à la modification de la température engendrée par la forêt (source routière), le jour ou la nuit

4.3.2.3 Influence de la topographie

Dans la plupart des outils prévisionnels, le sol entre la source et le récepteur est considéré comme plan ou bien est assimilé à un sol plan par estimation d'un sol plan moyen. Dans ce cas, seule la nature des sols est prise en compte au titre de « l'effet de sol », et la topographie est négligée. En réalité, dans bien des cas et tout particulièrement lorsque les distances de propagation sont importantes, la topographie du site ne peut plus être négligée et sa prise en compte peut modifier considérablement la prévision de la propagation de l'onde sonore entre la source et le récepteur.

En effet, si la source est en vue directe des habitations et que les rayons sonores se propagent à une altitude élevée par rapport au sol, « l'effet de sol » est faible et les phénomènes de divergence

géométrique et d'absorption atmosphérique sont prépondérants. En revanche, si la source n'est pas en vue directe des habitations à cause de la présence éventuelle d'un modelé de terrain, d'une butte ou de tout autre obstacle, la propagation sonore va être perturbée par la création de zones de diffraction et de réfraction (zone d'ombre) (Attenborough, Li, et Horoshenkov 2006). En fonction de la hauteur de l'obstacle, des distances respectives source-obstacle et obstacle-récepteur et de la nature des sols, l'effet complémentaire peut être de plusieurs décibels. À titre d'exemple, lorsque le récepteur est situé en zone d'ombre, des atténuations excédentaires comprises entre 5 et 8 dB ont été enregistrées pour une source omnidirectionnelle.

Concernant la contribution sonore des machines, la réfraction de l'énergie sonore due aux effets météorologogiques entraîne des courbures plus ou moins importantes, avec des trajectoires fuyantes courbées vers le ciel (conditions de propagation défavorables) ou au contraire rabattues vers le sol (conditions de propagation favorables). Avec du relief, ces phénomènes sont importants à prendre en compte car la courbure des rayons sonores associée à une topographie marquée peut entraîner des contournements du relief. Ainsi, des éoliennes qui sont partiellement ou totalement masquées par le relief peuvent être « visibles » d'un point de vue acoustique. C'est le cas lorsque les éoliennes sont situées sur un plateau, mais pas en bordure de celui-ci et que le vent souffle des éoliennes vers les habitations en contre bas. Pour ce type de situation, des comparaisons calculs / mesures montrent des écarts allant jusqu'à 15 dBA entre la modélisation de la propagation sonore suivant le rayon sonore rectiligne et la mesure.

Le coefficient de rugosité du sol, directement lié à la nature du relief et de la végétation, dimensionne la forme du gradient de vent. Ainsi, au niveau de la surface du sol, la vitesse du vent est nulle puis elle augmente avec la hauteur, plus ou moins vite selon la rugosité du sol (qui dépend de la topographie et des obstacles). Ceci se traduit par une variation plus ou moins sensible du bruit de la végétation en fonction de la vitesse du vent mesurée. Sur sol plat, à partir d'un vent modéré (supérieur à 6 m/s à 10 m du sol), le bruit du vent dans la végétation est sensible. Les niveaux sonores sont alors de l'ordre de 35 dBA de nuit pour une campagne calme avec végétation. Avec du relief, la problématique est bien différente, car les habitations sont souvent situées en contrebas de la ligne de crête, abritées du vent. Dans ces situations, les niveaux sonores varient peu avec la vitesse du vent, y compris pour des vitesses de vent élevées sur la ligne de crête. Il est fréquent de mesurer des niveaux sonores stables compris entre 25 et 30 dBA pour des vitesses de vent allant jusqu'à 7 – 9 m/s mesurées à 10 m de hauteur sur la ligne de crête.

- **Exemple : particularités des conditions de propagation pour un site à fort dénivelé**

La conjonction de niveaux résiduels faibles pour des vitesses de vent élevées et des conditions de propagation sonores favorables aux effets de contournement du relief, peut entraîner des situations à risques d'un point de vue impact acoustique.

Pour les sites avec un fort relief, les habitations sont généralement abritées du vent. L'expérience montre que dans ce type de situation, les niveaux sonores résiduels ne varient pas avec les vitesses de vent et les valeurs du bruit de fond sont de l'ordre de 25 dBA pour des vents de 6 m/s mesurés sur le site. Dans ces conditions, les distances minimales d'éloignement sont importantes.

Les parcs éoliens sont généralement implantés sur des sites ventés, afin de pouvoir recevoir un maximum d'énergie éolienne. Ceci est largement le cas dans des configurations géographiques de larges plaines ou de plateaux ainsi que dans des zones plus escarpées où les éoliennes sont implantées sur des lignes de crêtes.

Dans une configuration de plaine ou de plateau, les éoliennes sont généralement visibles de tous les endroits autour du site à l'exception des masques végétaux, tandis que dans une configuration montagneuse, le dénivelé entre les éoliennes et les habitations de l'ordre d'une centaine de mètres ou plus, entraîne des vues totalement ou partiellement masquées d'une ou plusieurs machines

Ces deux configurations topographiques conduisent à des ambiances sonores différentes en ce

qui concerne les niveaux résiduels et les niveaux de bruit des machines.

4.4 Prévision des niveaux de bruit

S'il est toujours possible de prévoir le bruit de façon « manuelle » dans quelques cas simples à l'aide de formules théoriques ou empiriques, l'estimation de l'exposition au bruit dans l'environnement se fait de nos jours essentiellement à l'aide de logiciels informatiques (exemple Figure 47 et Figure 48). L'augmentation de la puissance de calcul ainsi que des capacités de mémoire des ordinateurs permet désormais de traiter des espaces de plus en plus étendus et de prendre en compte des phénomènes de plus en plus complexes. Suivant le contexte de la prévision du bruit (étude d'ingénierie, recherche appliquée, recherche théorique), différents types de modèles numériques peuvent être utilisés, avec chacun leurs avantages et leurs inconvénients.

Figure 47 : vue des éoliennes depuis la plaine (à 950 m) – exemple de simulation des niveaux sonores

Figure 48 : exemple de carte de bruit des contributions sonores

On distingue ainsi deux grands types de modèle de prévision : les modèles de référence et les modèles d'ingénierie.

4.4.1 Modèles de référence

Les modèles de référence sont très souvent basés sur la résolution des équations de l'acoustique

et permettent de prendre en compte de nombreux phénomènes physiques (sol absorbant, présence de vent, etc.). Ils nécessitent cependant généralement des temps de calcul relativement longs et ne peuvent ainsi traiter actuellement que des domaines peu étendus ou à la géométrie simple. Ces modèles sont essentiellement utilisés et développés dans les laboratoires de recherche à des fins d'études et de compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Ils peuvent également servir de référence pour valider des modèles plus simplifiés.

Parmi les modèles de référence, on rencontre le modèle PE dit « à équation parabolique » (voir par exemple (Salomons *et al.* 2011) pour une description de ce modèle et de ses diverses variantes), le modèle FDTD (Salomons, Blumrich, et Heimann 2002), ou encore le modèle TLM (Guillaume *et al.* 2011). Ces modèles présentent l'intérêt d'être d'autant plus rapides que la fréquence étudiée est basse, ils permettent également la prévision du bruit à grande distance. Le modèle PE a par exemple été utilisé à plusieurs reprises pour la prévision du bruit éolien (Bolin 2009, Cotté et Tian 2016, MG_Acoustics 2014b, a), y compris pour la prévision des infrasons et basses fréquences sonores (Bolin *et al.* 2014).

4.4.2 Modèles d'ingenierie

Les modèles d'ingénierie sont des modèles qui font appel à des formulations très simplifiées des équations de l'acoustique, ainsi qu'à des méthodes de calcul très rapides. Ces formulations peuvent avoir été établies à partir d'approches empiriques expérimentales ou à l'aide des modèles de référence. Les modèles d'ingénierie prennent en compte un nombre restreint de phénomènes physiques mais leur approche simplifiée leur permet d'être extrêmement rapide et de pouvoir ainsi traiter de grandes zones (cartographie sonore à l'échelle d'un territoire par exemple). Si ces modèles ont été validés pour produire des résultats corrects « en moyenne » pour de nombreuses situations courantes, ils ne peuvent cependant pas effectuer des prévisions d'une grande précision. Ces modèles trouvent naturellement leur utilisation dans le cadre d'études d'ingenierie pour prévoir par exemple l'impact d'une infrastructure de transport, d'une industrie, lors d'études d'impacts réglementaires.

Presque tous les modèles d'ingénierie sont basés sur des méthodes de lancer de rayons simplifiées, dont le principe est d'identifier l'ensemble des principaux trajets de l'énergie acoustique entre une source et un récepteur. Le niveau sonore à ce récepteur est ensuite obtenu en retranchant des termes d'atténuation dus aux différents phénomènes décrits ci-dessus (divergence géométrique, effets de sol, effets météorologiques, etc.) au niveau de l'émission acoustique de la source. Les différences entre les modèles existants proviennent essentiellement de la façon d'identifier les rayons sonores, de la nature des phénomènes pris en compte, ainsi que de la façon de calculer l'atténuation due à ces phénomènes.

Les principaux modèles d'ingénierie utilisés pour le bruit des éoliennes sont l'ISO 9613-2:1996, Nord 2000 (Kragh *et al.* 2002), Harmonoise (Salomons *et al.* 2011), ainsi que le modèle Concawe (Marsh 1982), bien que plus ancien et d'usage plus restreint en France. Certains bureaux d'études acoustiques français ont également développé en interne des logiciels de prévision du bruit basés sur des méthodes « maison » (c'est à dire non basées sur des méthodes normalisées ou publiées). On peut regretter que, dans ce dernier cas, la description ou le formalisme adoptés pour la modélisation des phénomènes acoustiques, ainsi que des éléments de validation du modèle, ne soient pas toujours accessibles à l'utilisateur.

Dans la mesure où les modèles cités ci-dessus ont été intialement développés pour le bruit des transports ou pour le bruit industriel, la question de leur validité pour la prévision des infrasons et basses fréquences sonores ainsi que leur utilisation dans un contexte éolien se pose. L'ISO 9613-2 (modèle le plus utilisé dans le contexte éolien) n'est par exemple valide qu'au-dessus de 63 Hz et ne tient compte de l'influence de la météorologie (dont le vent) que de manière très sommaire (conditions favorables à la propagation uniquement). De plus, ce modèle n'a pas été initialement conçu et validé pour des sources très hautes, comme c'est le cas des éoliennes, ni pour tenir compte d'un effet de sol lié à une topographie non plate. Notons qu'une formulation de l'ISO 9613-

2 adapté au cas des IBF pour les éoliennes a été proposée récemment par Hansen (Hansen, Hansen, et Zajamšek 2015).

Les modèles Nord2000 et Harmonoise prennent en compte davantage de phénomènes mais ne sont valides qu'au dessus de 25 Hz.

La réglementation française n'impose actuellement aucun modèle d'ingenierie spécifique pour la prévision du bruit des éoliennes. Cette situation peut paraitre problématique dans la mesure où elle peut conduire à des disparités entre les résultats de prévision réalisés par des bureaux d'étude utilisant des modèles différents. La Figure 49 et la Figure 50 illustrent par exemple ces disparités entre trois modèles pour deux conditions de propagation[52]. Si les différences sont relativement restreintes pour les niveaux sonores en dBA, dans des conditions favorables à la propagation (1 à 2 dBA), elles augmentent de manière importante (>5 dBA au delà de 500 m) en fonction de la distance si les conditions de propagation sont défavorables.

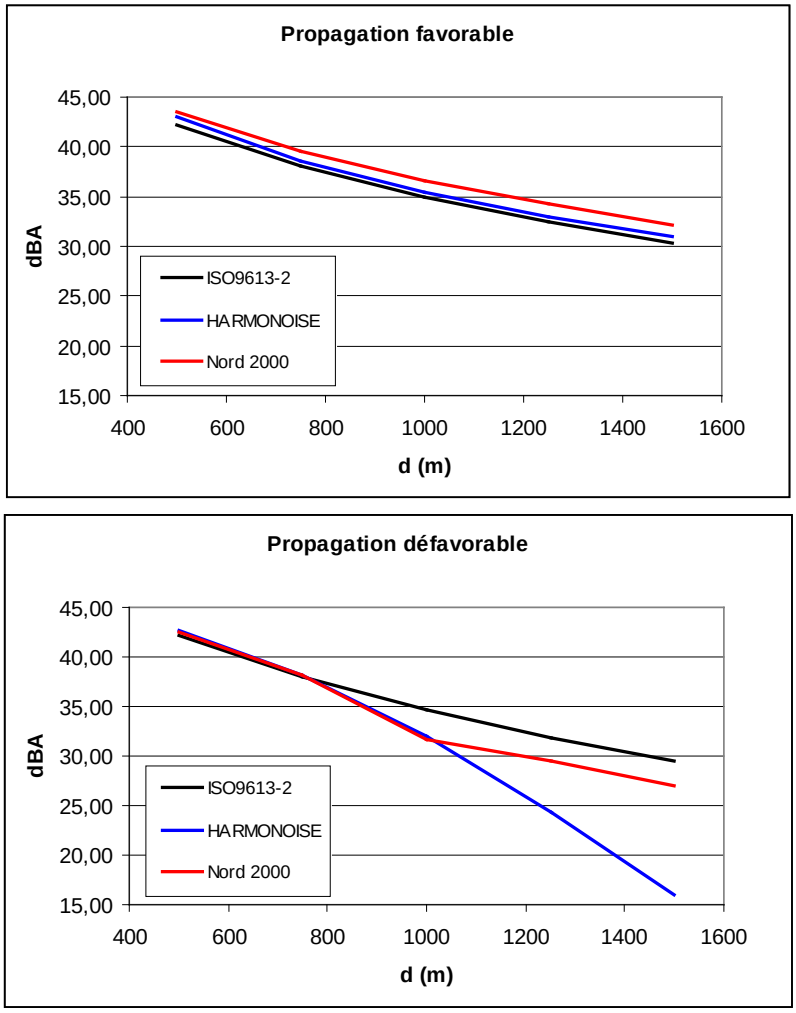


Figure 49 : Comparaison entre les niveaux sonores (dBA) calculés avec trois modèles d'ingénierie, à différentes distances d'une éolienne, pour des conditions favorables et défavorables à la propagation.

[52] L'utilisation de la norme ISO 9613-2 n'est pas possible pour des conditions défavorables à la propagation : pour des conditions défavorables le calcul se fait avec des conditions météorologiques homogènes, ce qui explique la surestimation des niveaux sonores par cette méthode pour les conditions défavorables.

Les écarts entre les modèles sont plus importants si l'on s'intéresse au calcul des spectres (cf. Figure 50) : les écarts peuvent atteindre 10 dB en conditions favorables et encore davantage en conditions défavorables. Les écarts sont cependant plus réduits pour les fréquences les plus basses (entre 2 et 5 dB pour 50 Hz).

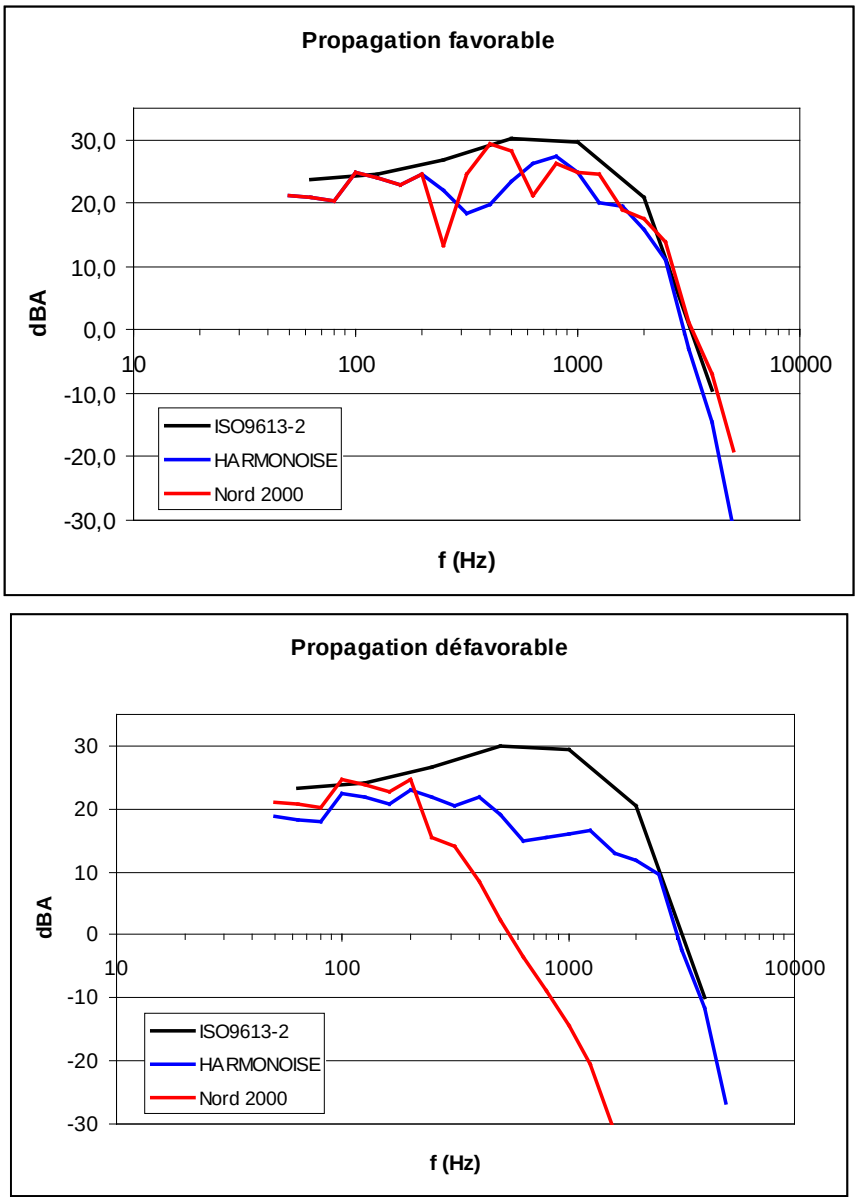


Figure 50 : comparaison entre les spectres (dB) calculés avec trois modèles d'ingénierie, à 500 m d'une éolienne, pour des conditions favorables et défavorables à la propagation.

4.5 Bruits solidiens générés par les vibrations des éoliennes

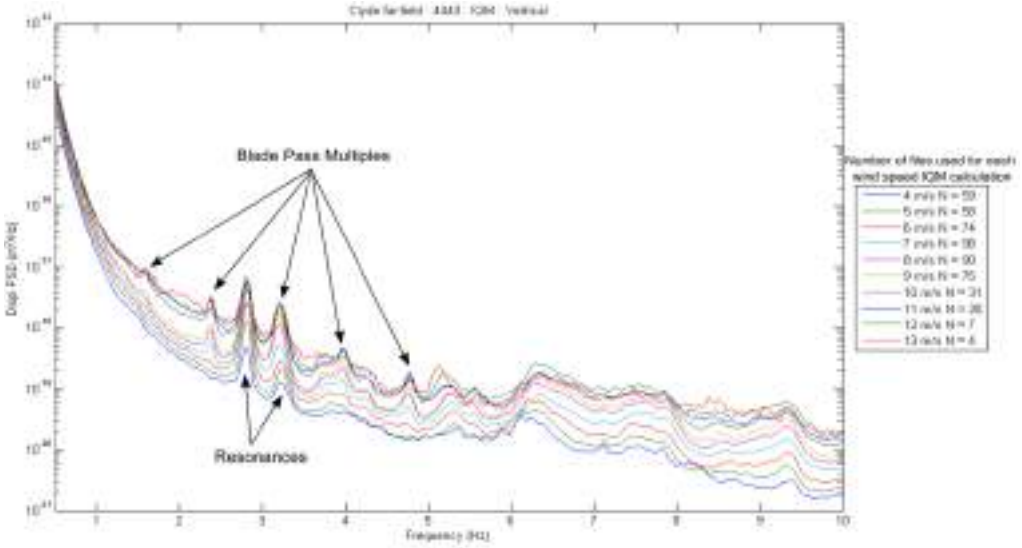
Cette partie examine l'hypothèse de génération d'infrasons et basses fréquences sonores dans un bâtiment, à la suite d'une transmission par le sol des vibrations générées par une éolienne.

- **Régimes de vibration d'une éolienne**

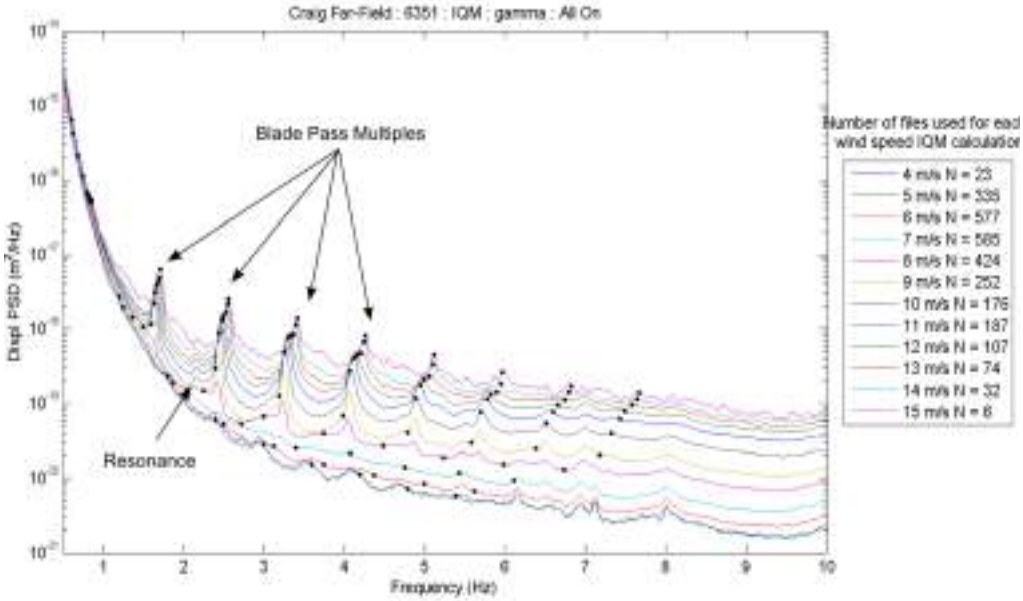
On distingue deux régimes de vibration principaux pour une éolienne (Xi_Engeneering_Consultants 2014). Le premier régime correspond à une vibration de l'ensemble de l'éolienne (massif de fondation, mât, nacelle et pales) selon ses modes vibratoires propres

(mouvements de flexion et mouvement de torsion du mât). Le second régime est lié au mouvement du rotor qui entraine des sollicitations mécaniques dans le mât (interaction mécanique du rotor en mouvement avec le mât, contraintes aérodynamiques sur le mat lors du passage d'une pale devant le mat). Si le premier régime peut exister lorsque l'éolienne est à l'arrêt et qu'elle est sollicitée par le vent, en exploitation il y a co-existence des deux régimes de vibrations.

Les fréquences associées au premier type de régime de vibration (voir Figure 51-a) sont indépendantes de la vitesse du vent mais sont inversement proportionnelles à la taille et à la masse de l'éolienne. Pour les grandes éoliennes (hauteur de 80 m et rotor de 90 m), elles vont de quelques dixièmes de hertz (modes de flexions) à quelques hetrz (modes de torsion), tandis que pour les petites éoliennes (hauteur < 25 m et rotor < 20 m) elles vont de quelques hertz (modes de flexions) à une dizaine de hertz (modes de torsion). Les fréquences associées au deuxième type de régime de vibration (rotation des pales) dépendent de la fréquence de passage des pales (triple de la fréquence de rotation du rotor), et donc de la vitesse du vent (voir Figure 51-b).



a) : prédominance du régime dû à la vibration de la structure seule



b) prédominance du régime dû à la rotation des pales

Source : (Xi_Engeneering_Consultants 2014)

Figure 51 : exemples de spectre de vibration d'une éolienne

Propagation des ondes dans le sol

Le couplage vibratoire entre la structure et le sol est peu documenté dans la littérature. Si la nature du sol et le dimensionnement des fondations joue un rôle important, il semble également que le transfert agisse davantage sur les amplitudes que sur les fréquences des vibrations transmises.

La propagation des vibrations dans le sol dépend fortement de la nature et de la structure des sols traversés. Les ondes mécaniques générées par les éoliennes dans le sol sont essentiellement des ondes de surface (Xi_Engeneering_Consultants 2014, Saccorotti *et al.* 2011), qui ont la caractéristique d'être faiblement atténuées avec la distance. Très peu de données sont disponibles dans la littérature sur les niveaux vibratoires relevés auprès des riverains et provenant des éoliennes, les quelques travaux existants montrent qu'au-delà de 300 m (LUBW 2016) à 700 m (études internes Cerema) d'une éolienne, les vibrations se confondent rapidement avec le bruit de fond vibratoire d'un site (vitesses vibratoires inférieures à 0,07 mm/s).

Transmission des vibrations dans un bâtiment - bruit solidien

Les vibrations du sol se transmettent au bâtiment et peuvent mettre en vibration ses parois (murs, sols, plafonds), puis donner ainsi naissance à une onde acoustique dans la pièce (phénomène de rayonnement acoustique de la paroi). Ce phénomène est appelé « bruit solidien », car issu d'une excitation vibratoire solidienne d'éléments structurel du bâtiment ; ils se rencontrent fréquemment en acoustique du bâtiment (transmission de bruit de choc par exemple). Une onde solidienne peut être créée à partir de vibrations de parois supérieures à 0,01 mm/s. Le niveau sonore des sons solidiens dépend non seulement de l'excitation vibratoire en pied de bâtiment mais également de la fonction de transfert vibratoire entre le pied du bâtiment et la paroi rayonnante. Ces fonctions de transfert sont très mal connues dans le domaine des basses fréquences.

Très peu d'informations sont disponibles concernant les sons solidiens générés par des vibrations provenant d'éoliennes. Cependant, la faible amplitude des niveaux vibratoires relevés dans les rares études disponibles laisserait à penser qu'il est assez improbable que des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores significatifs puissent être générés à l'intérieur des pièces d'un bâtiment, par les mécanismes décrits ci-dessus. Ceci reste cependant à confirmer, compte tenu du peu de connaissances disponibles dans ce domaine actuellement.

Synthèse du chapitre 4 : génération et propagation du bruit des éoliennes

▶ Caractéristiques des émissions sonores des éoliennes

Le bruit d'une éolienne résulte de la contribution sonore :

- de sources d'origine mécanique, localisées au niveau de la nacelle, dues aux parties tournantes telles que le multiplicateur (boite de vitesse) ;
- et de sources d'origine aérodynamique (sources principales sur les éoliennes modernes) résultant principalement du mouvement de l'air autour de chaque pale. D'autres bruits d'origine aérodynamique, tels que le cisaillement du flux d'air situé entre les pales et la tour peuvent également être à l'origine de bruit en très basse fréquence.

Une éolienne constitue une source importante de bruit basses fréquences et d'infrasons, avec un spectre d'émission qui décroit typiquement de 4 dB/octave. Quelques raies fréquentielles spécifiques liées à la rotation des pales ou à la machinerie dans la nacelle se superposent par ailleurs à ce spectre d'émission dans la partie infrasons et basses fréquences (voir Figure 31) ;

Dans le domaine des basses fréquences, en l'absence de données documentées à l'heure actuelle, il est raisonnable de considérer l'éolienne comme une source omnidirectionnelle.

▶ Autres sources sonores basses fréquences dans l'environnement

D'autres sources sonores peuvent être à l'origine de bruits dans les infrasons et basses fréquences dans l'environnement. À titre d'exemple :

- les activités humaines (exemple : trafic routier, activités agricoles, sites industriels, *etc)* dont les bruits ont une grande variabilité temporelle et dépendent des activités locales,
- le vent sur des obstacles,
- la végétation (sous l'effet du vent).

Différentes études montrent que le masquage du bruit éolien par ces différentes sources de l'environnement est assez peu efficace en basses fréquences.

▶ Caractéristiques de la propagation des sons basses fréquences

L'atténuation des ondes sonores dépend essentiellement de la divergence géométrique et de l'effet de sol. À des distances importantes (plusieurs centaines de mètres), les effets météorologiques doivent en général être pris en compte et peuvent conduire à un renforcement ou une diminution de l'effet de la divergence géométrique :

- la divergence géométrique entraine une diminution du niveau sonore avec la distance. Cette atténuation est identique pour les basses fréquences et pour les fréquences plus élevées, à raison de -6 dB par doublement de la distance ; des atténuations de l'ordre de 3 dB par doublement de distance ont pu être observées mais elles sont dues à une influence des effets météorologiques s'ajoutant à la divergence géométrique ;
- les basses fréquences sont très peu atténuées avec la distance par le phénomène d'absorption atmosphérique ;
- pour les basses fréquences (< 50 Hz), le phénomène d'interférences dû au sol n'existe pas dès lors que l'on se situe à plus de 500 m environ de l'éolienne ;
- pour les basses fréquences (< 50 Hz), l'effet de sol en conditions rasantes peut entraîner

des variations de niveau sonore de quelques dB suivant la distance

- **Génération de bruit basse fréquence par excitation vibratoire des éoliennes**

Les éoliennes sont une source de vibrations mécaniques basses fréquences. Suivant la taille de l'éolienne, les fréquences de vibrations vont de quelques dixièmes à quelques dizaines de hertz. Le mouvement des pales génère également des vibrations à des fréquences proportionnelles à la fréquence de passage des pales.

La propagation des vibrations d'une éolienne jusqu'à un bâtiment se fait *via* le sol sous la forme d'ondes de surface. Les rares données disponibles tendent à montrer qu'au-delà de 700 m, les vibrations générées par une éolienne se confondent avec le bruit de fond vibratoire du site.

La faible amplitude des niveaux vibratoires provenant d'éoliennes laisse à penser qu'il est improbable que des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores significatifs puissent être générés à l'intérieur des pièces d'un bâtiment par des mécanismes d'excitation vibratoires provenant d'éoliennes (étant donné le peu d'études diponibles sur ce sujet, des études complémentaires seraient toutefois nécessaires pour confirmer ces hypothèses).

5 Exposition aux basses fréquences et infrasons des éoliennes

5.1 Campagnes de mesures

5.1.1 Objectifs visés

Afin de compléter les données issues de la littérature scientifique, le groupe de travail a piloté des campagnes de mesures de bruit (incluant basses fréquences et infrasons) à proximité de plusieurs parcs éoliens. Ces mesurages acoustiques ont été réalisés par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema[53]). Le texte de saisine à l'origine de ces travaux d'expertise (voir Annexe 1) requiert explicitement la réalisation de ces campagnes de mesures et mentionne deux sites d'intérêt, car concernés par les plaintes de riverains relatives aux infrasons et/ou aux vibrations :

- parc éolien de Saint-Servant-sur-Oust (56) ;
- parc éolien de Freycenet-la-Tour-Moudeyres (43).

Compte-tenu de la forte diversité des parcs éoliens (voir analyse du parc éolien au § 2.3) et des disparités géographiques, une étude exhaustive de l'ensemble des situations à l'échelle nationale aurait nécessité des moyens démesurés, en matière de budget et surtout de temps, et incompatibles avec ceux du groupe de travail.

Ces campagnes de mesure ont donc été effectuées sur un nombre restreint de parcs éoliens. Elles avaient pour objectif de documenter les expositions sonores dues aux éoliennes, en particulier pour les basses fréquences et infrasons, par des mesures dans plusieurs situations jugées clés et de les comparer aux données disponibles dans la littérature scientifique.

Les données d'exposition sonore ainsi récoltées n'ont pas été accompagnées d'un recueil de données de santé des riverains qui aurait pu permettre d'évaluer la corrélation entre exposition aux basses fréquences sonores / infrasons et prévalence d'état de santé. En effet, une telle étude épidémiologique constitue un programme de recherche scientifique à part entière réclamant une forte exigence de qualité[54], et donc un temps de préparation et de réalisation inconciliable avec le calendrier d'expertise du groupe de travail. Néanmoins, ces premiers éléments d'exposition pourront par la suite aider à la réalisation éventuelle d'une telle étude.

[53] Le Cerema est un établissement public, créé en 2014 pour apporter un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement. Il regroupe les huit ex-Centres d'études techniques de l'équipement (CETE), l'ex-Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Certu), l'ex-Centre d'études techniques, maritimes et fluviales (CETMEF), et l'ex-Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Setra).

[54] Prise en compte d'un nombre suffisant d'individus (exposés et non exposés) pour disposer d'une puissance statistique adéquate, éviter les biais de sélection, constitution d'un protocole de recueil de la gêne limitant les biais de déclaration, etc.

5.1.2 Sélection des parcs éoliens et situations étudiées

La sélection des sites (parcs éoliens) devant faire l'objet des campagnes de mesures a été effectuée au regard d'un compromis entre le nombre de sites à inclure dans l'étude et le niveau d'analyse souhaité pour chacun de ces sites.

Compte-tenu de la complexité des mesures de basses fréquences sonores et d'infrasons générées par les éoliennes (voir § 2.2.3), le groupe de travail a opté pour la réalisation d'une campagne de mesure par site incluant des points de mesures plus nombreux et des périodes de mesures plus longues plutôt que de réaliser des mesures moins précises dans un plus grand nombre de sites étudiés. Ainsi, le protocole des campagnes de mesures (détaillé au § 5.1.3) a été construit de manière à disposer de données pour :

- l'ensemble des classes de vent possibles (catégories de vitesses et de directions du vent) ;
- plusieurs localisations jugées d'intérêt (4 points de mesure, voir § 5.1.3 et Figure 55) :
    - à la distance minimale d'éloignement réglementaire (500 m) ;
    - en façade et à l'intérieur d'une habitation (de préférence, la plus proche possible d'une éolienne) ;
    - et à proximité de la source afin de caractériser l'émission sonore des sources (éoliennes).

Afin de guider le choix des parcs éoliens à inclure, plusieurs critères d'intérêt ont été identifiés :

- **émissions / expositions majorées** : l'exposition aux basses fréquences sonores et aux infrasons émis par les éoliennes dépend de certaines caractéristiques techniques (puissance, diamètre des pales, nombre d'éoliennes par parc, marque, année de mise en service) et topographiques. Ces caractéristiques permettent d'identifier un ou plusieurs sites pour lesquels les expositions aux basses fréquences et infrasons sont présumées théoriquement les plus importantes ;
- **existence de plaintes liées aux basses fréquences et/ou infrasons** : l'expression de plaintes spécifiques aux basses fréquences et/ou infrasons peut indiquer des situations d'exposition particulières intéressantes à explorer. Il est intéressant de comparer ces expositions à celles dues à des parcs techniquement équivalents mais ne faisant pas l'objet de plaintes connues ;
- **caractéristiques techniques typiques du parc français actuel** : si l'analyse au § 2.3 souligne bien l'hétérogénéité du parc éolien français, certaines caractéristiques techniques sont spécifiques aux parcs les plus récents (nombre d'éoliennes par parc, hauteur du mât, dimension des pales, puissance et marques les plus fréquentes). L'étude de tels sites constitue un intérêt pour caractériser la situation actuelle ;
- **caractéristiques techniques typiques des futures éoliennes implantées en France** : les informations recueillies indiquent l'émergence d'éoliennes de plus grandes dimensions et de plus grande puissance unitaire. L'étude de ces éoliennes constitue un intérêt pour caractériser les probables situations à venir (éoliennes qui feront l'objet de nouvelles implantations) ;
- **situations topographiques particulières** : plusieurs configurations topographiques sont à distinguer pour leurs possibles effets sur la propagation des émissions sonores (éoliennes en champ libre ou en surplomb) ;
- **distances éoliennes - habitations** : en dernier critère, les sites pour lesquels les habitations sont les plus proches des éoliennes sont favorisés, cela afin de disposer de données d'exposition pertinentes pour les habitations (en façade et en intérieur des constructions).

Au terme d'une réflexion confrontant l'ensemble de ces critères et les caractéristiques connues des parcs éoliens en France, trois sites ont été sélectionnés.

5.1.2.1 Site 1 : parc « majorant » et typique des futures éoliennes (parc éolien de la Motelle)

Le parc éolien de la Motelle (communes concernées : Banogne-Recouvrance, Le Thour, Saint-Quentin-le-Petit) situé dans le département des Ardennes, en région Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine, est constitué de 2 lignes de 4 éoliennes chacune, qui sont parmi les plus grandes (diamètre de pales) et les plus puissantes en fonction en France, aux dates de cette période d'analyse.

Ces caractéristiques (voir Tableau 33) confèrent un double intérêt : ces aérogénérateurs sont théoriquement ceux émettant le plus de bruit basses fréquences et d'infrasons du fait de leurs grandes dimensions et constituent ainsi une préfiguration des futures éoliennes de plus de 3 MW.

Tableau 33 : caractéristiques du parc éolien de la Motelle

Nom du parc	Nombre de machines	Puissance unitaire (MW)	Hauteur des nacelles (m)	Diamètre des pales (m)	Marque des éoliennes	Année de construction
Parc éolien de La Motelle	8	3,075	94	112	Vestas	2013

Les caractéristiques techniques de ces aérogénérateurs[55] indiquent que ceux-ci disposent d'une boite de vitesse (4 rapports) et fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 2,5 et 25 m/s (vitesse nominale de vent : 13 m/s). La vitesse maximale de rotation est de 17,7 tours/min.

L'environnement plan est particulièrement propice à la propagation sonore et les distances des habitations les plus proches (espaces en rose dans la Figure 52, les éoliennes sont entourées en rouge) sont conformes aux critères requis[56] pour la réalisation de l'étude.

Ce parc installé en 2013 ne semble pas faire l'objet de plainte de la part des riverains des communes avoisinantes.

[55] http://www.thewindpower.net/turbine_fr_1076_vestas_3075.php.

[56] Distances éoliennes-habitations les plus proches de moins de 1 km.

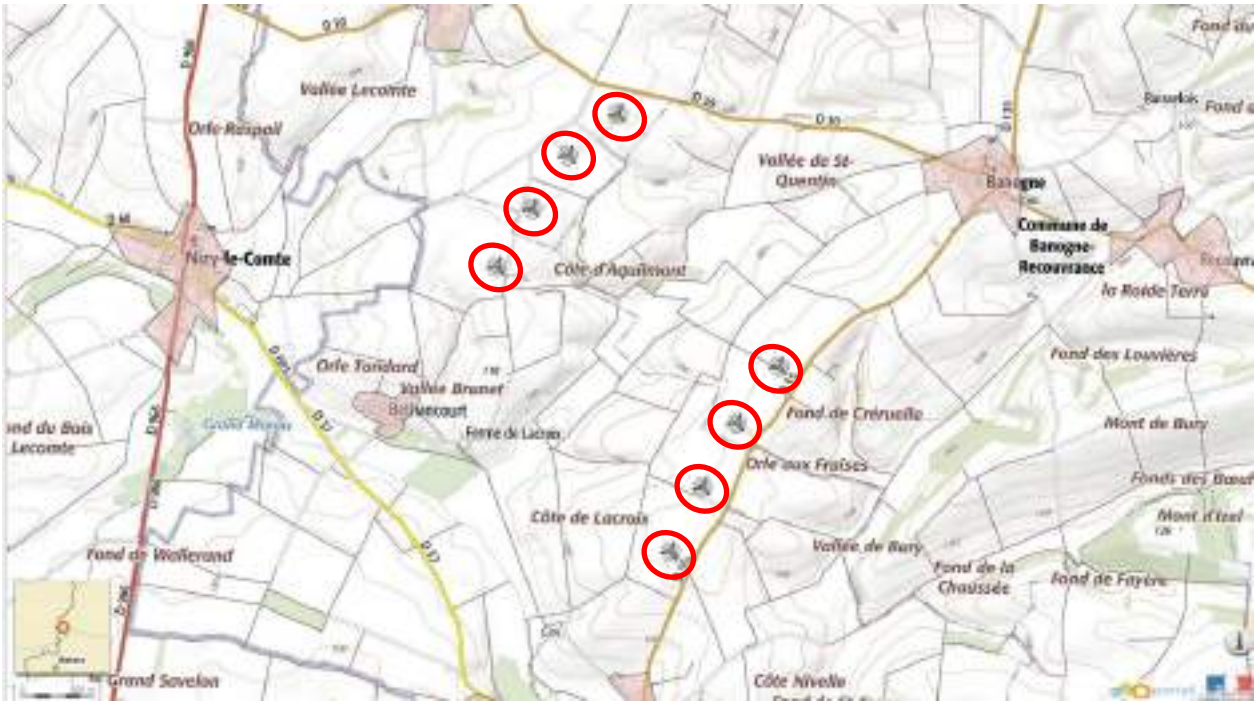


Figure 52 : positionnement du parc de la Motelle (source : Géoportail)

5.1.2.2 Site 2 : parc « classique », faisant l'objet de plaintes (parc éolien du Val de Noye)

Installé en 2009 dans le département de la Somme en région Hauts de France (communes concernées : Louvrechy, Thory, Chirmont, Sourdon), le parc du Val de Noye est constitué de 2 lignes de 6 éoliennes chacune, situées sur les territoires de 4 communes (voir Figure 53).

D'après ses caractéristiques (voir Tableau 34), ce parc s'apparente à un parc relativement classique, bien que la marque d'aérogénérateurs (Siemens SWT-2.3-93) soit assez peu courante. Ceux-ci disposent d'une boite de vitesse (3 rapports) et fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 3,5 et 25 m/s (vitesse nominale de vent : 13 m/s) pour des vitesses de rotation comprises entre 6 et 16 tours/min.

Tableau 34 : caractéristiques du parc éolien du Val de Noye

Nom du parc	Nombre de machines	Puissance unitaire (MW)	Hauteur des nacelles (m)	Diamètre des pales (m)	Marque des éoliennes	Année de construction
Parc éolien du Val de Noye	12	2,3	80	93	Siemens	2009

L'audition d'une riveraine de ce parc par le groupe de travail a permis de disposer d'éléments d'informations supplémentaires. Suite au dépôt de plusieurs plaintes par des habitants de la commune de Louvrechy, des mesures acoustiques avait permis de constater d'importantes émergences sonores (bruit audible) en période nocturne (entre 4 et 11,5 dBA, l'émergence admissible réglementaire étant de 3 dBA, cf. § 3.1.1.1). Conséquemment à ces mesures, un plan de bridage[57] a été imposé par Arrêté préféctoral (mars 2014) afin de respecter la réglementation en vigueur.

Néanmoins, malgré le retour à une situation conforme aux exigences réglementaires, plusieurs

[57] Période restreinte de fonctionnement et/ou bridage de la vitesse de rotation des pales en vue de limiter le bruit résultant chez les riverains.

riverains relatent une persistance de symptômes pouvant s'apparenter à la description du syndrome éolien (sommeil perturbé, acouphènes, etc., voir § 2.5.1).

La présence de tels symptômes déclarés, souvent associés d'après les plaignants aux effets des infrasons, alors que le cadre réglementaire pour le bruit audible est dorénavant respecté et vérifié, soulève des questions. Cette situation s'avérait donc particulièrement intéressante et méritait d'être étudiée dans le cadre de cette campagne de mesures.

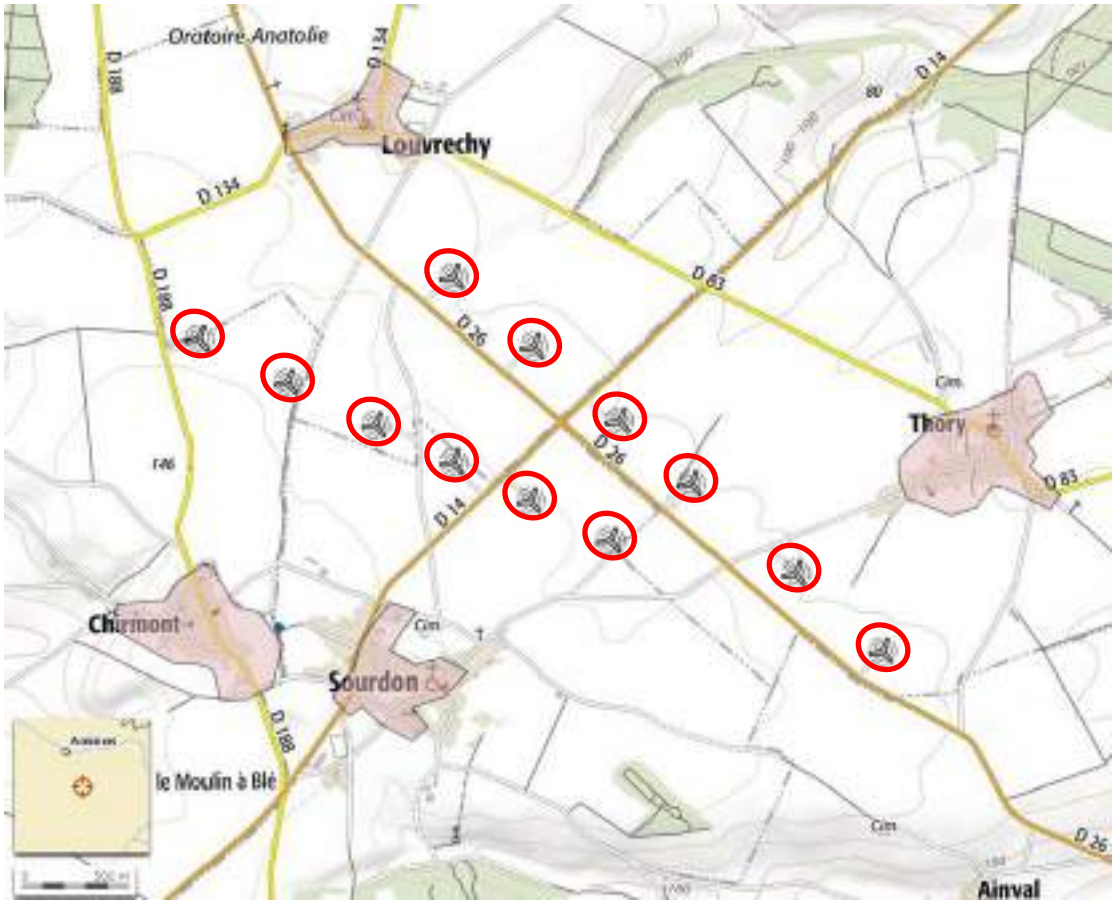


Figure 53 : positionnement du parc du Val de Noye (source : Géoportail)

5.1.2.3 Site 3 : parc « classique » ne faisant pas l'objet de plaintes (parc éolien Énergie du Porcien)

Le parc éolien du Porcien s'inscrit dans une configuration courante (voir Tableau 35) d'une dizaine d'aérogénérateurs de marque fréquemment rencontrée en France. Ces turbines, disposées en 2 lignes (voir Figure 54) comprennent une boite de vitesse (3 rapports) et fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 3,5 et 22 m/s (vitesse nominale : 13 m/s) pour des vitesses de rotation comprises entre 7,8 et 15 tours/min.

Tableau 35 : caractéristiques du parc éolien Énergie du Porcien

Nom du parc	Nombre de machines	Puissance unitaire (MW)	Hauteur des nacelles (m)	Diamètre des pales (m)	Marque des éoliennes	Année de construction
Parc éolien du Porcien	10	2,05	100	92	Senvion	2011

Le terrain environnant s'apparente à celui des autres sites (même type de terrain, relief plat à très

légèrement vallonné). Le choix de disposer d'environnements semblables et propices à la propagation sonore facilite la comparaison des résultats entre sites et est susceptible de majorer en même temps la contribution liée à cet aspect de propagation. Seules les sources sonores (caractéristiques des aérogénérateurs et disposition spatiale) et les facteurs météorologiques pourront raisonnablement expliquer les possibles différences observées.

Les habitations des communes les plus proches (Saint Germainmont et Le Thour) se situent au-delà de 900 m. Aucune plainte concernant ce parc mis en fonction en 2011 n'a été rapportée

Figure 54 : positionnement du parc du Porcien (source : Géoportail)

5.1.2.4 Autres sites désignés par le texte de saisine

Les deux sites faisant l'objet de plaintes et indiqués dans la lettre de saisine n'ont pas été retenus, en raison de leur moindre intérêt en comparaison de ceux sélectionnés et présentés précédemment.

Concernant le parc de Saint-Servant-sur-Oust, la plainte a abouti à la mise en vigueur d'un plan de bridage en journée et d'un fonctionnement très réduit la nuit (22h-7h). Une éolienne a par ailleurs été équipée de dispositifs expérimentaux de réduction du bruit. Les niveaux sonores attendus sont par conséquent réduits et ne correspondraient plus à ceux qui ont motivé la plainte. Son fonctionnement est devenu atypique par rapport à l'ensemble des parcs existants. De plus, ces éoliennes sont situées le long d'une route passante susceptible d'interférer avec le signal sonore éolien et donc de fortement compliquer l'exploitation des mesures.

Le parc éolien de Freycenet-la-Tour-Moudeyres (parc des Barthes) se situe quant à lui dans un relief vallonné et à grande distance d'habitations. Les éoliennes sont de dimensions modestes (pales de 70 m de diamètre contre des dimensions de plus de 80 m pour la plupart des éoliennes). La plainte relayée par le texte de saisine concerne un riverain localisé à grande distance de la plus proche éolienne (plus de 11 km). Compte-tenu de ces éléments, ce site n'a pas été retenu.

Néanmoins, les informations recueillies au cours de l'audition d'une riveraine de ce parc éolien par le groupe de travail ont souligné l'intérêt que pourrait comporter l'étude de ce parc atypique dans un second temps (possibles phénomènes d'écho, positionnement atypique des éoliennes, relief vallonné).

5.1.3 Protocoles de mesure

L'objectif de chaque campagne expérimentale est de caractériser le bruit dû aux infrasons et basses fréquences sonores qui peut être relevé chez un riverain d'un parc éolien et dont l'origine est le parc éolien. Des données complémentaires nécessaires à l'exploitation des résultats ont été recueillies après la campagne de mesure auprès des exploitants des parcs éoliens (voir ci-dessous). Ceux-ci n'ont ainsi été informés de la réalisation de la campagne de mesures qu'une fois celle-ci terminée.

L'objectif des mesures était de :

- relever les niveaux sonores et les spectres basses fréquences à différentes distances, (ainsi qu'à l'intérieur du logement d'un riverain de chaque site ;
- observer si l'énergie sonore basses fréquences émise par l'éolienne est modifiée au cours de la propagation entre la source et la façade du bâtiment du riverain, ainsi que par la transmission à travers la façade du riverain vers l'intérieur de son logement.

Cette caractérisation porte ainsi sur :

- le bruit émis par la source ;
- la propagation acoustique entre la source et un riverain ;
- le bruit résultant en façade du bâtiment d'un riverain ;
- le bruit résultant à l'intérieur du logement d'un riverain.

Le vent étant un facteur qui agit aussi bien sur l'émission acoustique de la source que sur la propagation du bruit, les campagnes de mesures s'accompagnent d'une caractérisation des conditions météorologiques (vitesse et direction du vent), afin de mettre en relation le niveau sonore relevé chez le riverain avec les conditions de propagation liées aux conditions météorologiques (voir § 4.2.2).

Le protocole expérimental comprend l'installation de 3 à 4 points de mesures acoustiques et de 1 point de mesure météorologique pendant une durée d'une semaine. Un point est situé à proximité de l'éolienne afin d'estimer son émission acoustique, un point est situé à une distance de 500 m de l'éolienne la plus proche du riverain, un point est situé à l'extérieur de l'habitation du riverain. Un point supplémentaire a été placé à l'intérieur d'une habitation riveraine (Figure 55).

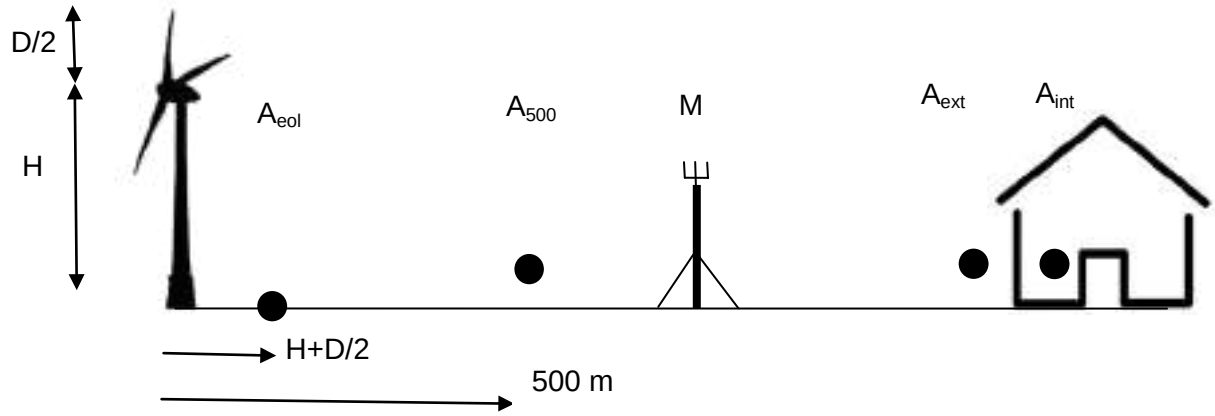


Figure 55 : schéma de principe de la localisation des points de mesure acoustique (A_{eol}, A_{500}, A_{ext}, A_{int}) et météorologique (M)

Les périodes de mesures sont les suivantes :

- site 1 : 12/10/2015 au 19/10/2015 (1 000 échantillons de 10 min exploitables) ;
- site 2 : 30/06/2015 au 06/07/2015 (887 échantillons de 10 min exploitables) ;
- site 3 : 23/03/2015 au 27/03/2015 (541 échantillons de 10 min exploitables).

Des compléments sur le protocole expérimental et le matériel mis en œuvre sont donnés en Annexe 7.

▶ Mesures de l'émission acoustique de l'éolienne la plus proche du riverain

Un relevé acoustique a été réalisé à proximité de l'éolienne la plus proche d'un riverain (cf. Figure 55, point A_{eol}). Ce point comprend l'installation d'un microphone placé au sol sur une plaque réfléchissante d'un diamètre de 1 m, et situé suivant les prescriptions de la norme NF EN 61400-11 à une distance égale à la hauteur maximale atteinte par l'extrémité d'une pale. Afin de limiter le bruit du vent sur le microphone, ce dernier est équipé d'une protection anti-vent spécifique (cf. Figure 56). La disposition du microphone, l'emplacement du point de mesure, ainsi que les caractéristiques de la protection anti-vent suivent les prescriptions de la norme précitée. Le niveau sonore mesuré au niveau du point A_{eol} permet d'obtenir la puissance acoustique apparente de l'éolienne (voir Annexe 7).

Figure 56 : point de mesure de la puissance acoustique apparente de l'éolienne (point A_{eol}) avec sa protection anti-vent

▶ Mesures acoustiques à 500 m

Un point de mesure acoustique a été placé entre le logement d'un riverain et l'éolienne la plus proche de ce logement, afin de quantifier les spectres sonores à la distance minimale réglementaire de 500 m en deçà de laquelle il ne peut y avoir d'habitation. La mesure est effectuée à une hauteur de 2 m.

▶ Mesures acoustiques en façade et chez le riverain

Le bruit en façade du logement du riverain a été caractérisé à l'aide d'un point de mesure placé à 2 m en avant d'une ouverture de l'habitation (fenêtre, porte-fenêtre, etc.) à 2 m de hauteur.

Figure 57 : exemples de points de mesure en façade de bâtiment

Le bruit à l'intérieur d'une pièce du logement a été mesuré à l'aide d'un microphone placé à 1,5 m de hauteur et localisé aux 2/3 de la diagonale principale de la pièce afin de se prémunir des principaux phénomènes de résonnances dans la pièce. Le point en façade est situé face à une ouverture de la pièce dans laquelle est placé le point dans le logement.

- **Mesures d'isolement acoustique de la façade**

Afin de caractériser les performances acoustiques de la façade du bâtiment dans lequel est placé le point A_{int}, une mesure de l'isolement acoustique vis à vis des bruits de l'extérieur a été réalisée selon la norme EN ISO 10 052. Ceci consiste à émettre avec un haut parleur un bruit de fort niveau à l'extérieur, et à mesurer simultanément le spectre sonore à l'intérieur de la pièce du bâtiment et à l'extérieur face à une fenêtre de cette pièce. L'isolement est obtenu est faisant la différence entre les deux spectres (on parle alors d'isolement brut). Cet isolement traduit la capacité de la paroi à atténuer le bruit provenant de l'extérieur du bâtiment.

- **Mesures météorologiques**

Un anémomètre à ultrasons 3D placé sur un mât de 10 m de haut (point M, Figure 55), entre l'éolienne et le logement du riverain, a permis de mesurer la vitesse et la direction du vent sur des périodes de 10 minutes, ainsi que des grandeurs turbulentes (vent et température). Après un traitement adapté (Gauvreau *et al.* 2009), ces dernières permettent de caractériser l'état de stabilité de l'atmosphère et d'estimer les conditions de propagation acoustique entre l'éolienne la plus proche du logement considéré et l'habitation. L'estimation du gradient vertical de température, du gradient vertical de vitesse de vent et de la direction du vent permettent d'accéder à la valeur du gradient vertical de vitesse du son, puis de déterminer pour chaque échantillon de 10 min la condition de propagation associée (Gauvreau *et al.* 2009).

Suite à un problème de matériel lors de la réalisation des mesures, ce type d'information n'est pas disponible pour le site 3.

Figure 58 : mât météorologique de 10 m de hauteur (à gauche) comportant un anémomètre à ultrasons 3D (à droite), installé au point M

- **Autres relevés**

Les exploitants des parcs éoliens des sites 1 et 3 ont fourni la production électrique des éoliennes ainsi que la vitesse et la direction des vents mesurés au niveau de la nacelle au cours de la période de mesure acoustique[58]. La vitesse de vent au niveau de la nacelle permet d'obtenir la vitesse de vent standardisée à 10 m de hauteur selon la procédure décrite dans la norme NF EN 61400-11 (voir Annexe 7).

5.1.4 Traitement des données recueillies

- Les périodes présentant des bruits perturbateurs clairement non attribuables aux éoliennes sont exclues des analyses. Cela concerne en particulier les bruits provenant des activités locales du site, les bruits de la faune locale, ainsi que les périodes de pluie marquée continues ou les périodes où les éoliennes étaient à l'arrêt ;
- les spectres des niveaux sonores sont déterminés à partir des niveaux sonores L50[59] calculés sur des périodes de 10 minutes ;
- des indicateurs complémentaires, tels que le niveau sonore en dBG, sont calculés à partir des données mesurées en tiers d'octave ;
- les conditions de propagation entre l'éolienne la plus proche et le logement du riverain sont estimées en fonction de la valeur du gradient de vitesse du son à une hauteur de 10 m : un gradient positif est associé à des conditions favorables à la propagation sonore (niveaux sonores renforcés), tandis qu'un gradient négatif est associé à des conditions de propagation défavorables à la propagation (niveaux sonores atténués) ;
- la représentativité des conditions observées lors de chaque campagne, par rapport à des conditions moyennes annuelles, a été appréciée pour chaque site en comparant les données de vent mesurées (vitesses et directions), lors des campagnes acoustiques à la

[58] Afin de ne pas interférer dans un contentieux en cours sur le site 2 entre un riverain et l'exploitant de ce site, il a été jugé opportun de ne pas contacter l'exploitant du site 2.

[59] médiane des niveaux sonores relevés pendant la période de 10 min. Cela correspond ainsi au niveau sonore dépassé 50 % du temps.

rose des vents de chaque site (source : Météo France). Il apparait ainsi que 66 % des conditions annuelles de vent ont été observées pour le site 1, 75 % pour le site 2 et 38 % pour le site 3 (voir Annexe 5).

5.2 Résultats de la campagne de mesure

- **Niveaux globaux**

On observe que le niveau global d'émission sonore augmente, comme attendu, avec la vitesse de vent (Figure 59). Ce résultat bien connu (voir par exemple Bowdler *et* al 2012) est visible aussi bien sur le niveau sonore en dBA, que sur le niveau global des infrasons et basses fréquences sonores exprimé en dBG (voir Figure 59). Le taux de croissance avec la vitesse du vent est sensiblement identique pour les niveaux audibles (dBA) et pour les niveaux IBF (dBG). Les niveaux de puissance globaux sont sensiblement les mêmes pour chaque site car les puissances électriques des éoliennes sont sensiblement équivalentes, allant de 2 MW (site 3) à 3 MW (site 1). Les vitesses de vent rencontrées expérimentalement ne sont pas suffisamment élevées pour mettre clairement en évidence le plateau de bruit, typique de l'émission sonore d'une éolienne en conditions de fonctionnement nominales (Bowdler et Leventhall 2012) : pour les éoliennes considérées, ce plateau devrait atteindre théoriquement 106 dBA (site 1), 105 dBA (site 2) et 104 dBA (site 3), selon l'estimation proposée par Møller et Pedersen (Møller et Pedersen 2011) à partir de la puissance électrique nominale.

Pour une classe de vitesse de vent donnée, l'émission sonore des éoliennes présente une dispersion[60] assez faible pour le site 1 et le site 3 (Figure 60), en particulier pour les vitesses de vent les plus élevées. Pour le site 2, l'émission présente en revanche une dispersion non négligeable qui peut atteindre 10 dBA ou 10 dBG. L'influence de fluctuations importantes des conditions atmosphériques sur la génération du bruit aérodynamique au niveau des pales[61] pourrait expliquer en partie ce phénomène, mais cette explication n'est cependant pas totalement satisfaisante et ne permet pas d'exclure d'autres causes possibles (comportement atypique de l'éolienne, bruit mécanique important, etc.). Pour les 3 sites, on constate une dispersion légèrement plus élevée pour les niveaux des infrasons et basses fréquences sonores (dBG) que pour les niveaux sonores audibles (dBA) (cf. Figure 60).

[60] Intervalle contenant 75 % des échantillons autour de la médiane.

[61] sur ce phénomène, voir (Tian et Cotté 2015) par exemple.

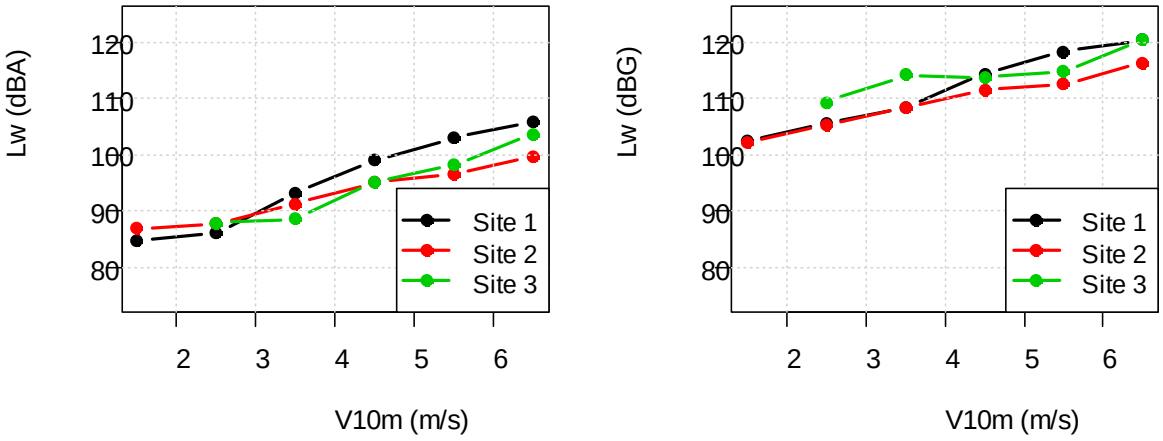
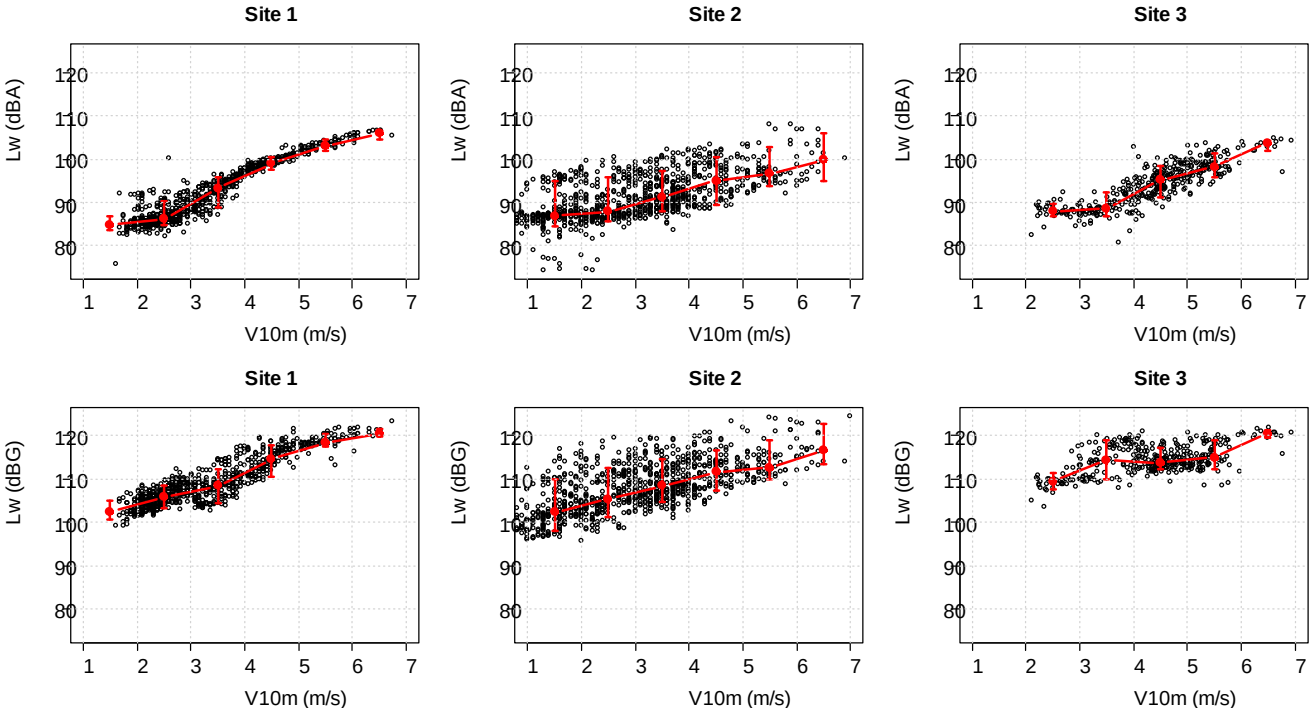


Figure 59 : niveaux de puissance acoustique médians[62] en fonction de la vitesse du vent, exprimés en dBA (à gauche) et en dBG (à droite).



Points rouges : niveaux sonores médians, barres rouges : intervalles contenant 75 % des échantillons autour de la médiane des niveaux sonores d'une classe de vent.

Figure 60 : niveau de puissance acoustique en fonction de la vitesse du vent à 10 m, exprimé en dBA (haut) et en dBG (bas).

Spectres

Pour tous les sites, les spectres d'émission ont un contenu large bande où les infrasons et basses fréquences sont majoritaires (Figure 61). On note la présence de bruit prédominant à certaines fréquences dans certaines conditions, par exemple entre 10 et 20 Hz, et entre 50 et 100 Hz. Ceci peut être dû soit à la boite de vitesses au niveau de la nacelle, estimée contribuer aux alentours de 20 Hz (Sawalhi et Randall 2014), ou à des composants au niveau de la nacelle (refroidissement,

[62] Le niveau médian correspond à la médiane des niveaux de puissance situés dans chaque classe de vitesse de vent contenant un minimum de 10 échantillons valides.

etc.), soit à des harmoniques supérieures de la fréquence de rotation de passage des pales au droit du mât dont la fréquence fondamentale est estimée de l'ordre de 1 Hz (Zajamšek *et al.* 2016, Zajamsek, Moreau, et Doolan 2014). Ces composantes tendent à disparaitre lorsque la vitesse de vent augmente, car elles sont alors masquées par le bruit aérodynamique des pales. Par ailleurs, on note également un renforcement graduel du bruit IBF lorsque la vitesse de vent augmente (Figure 61).

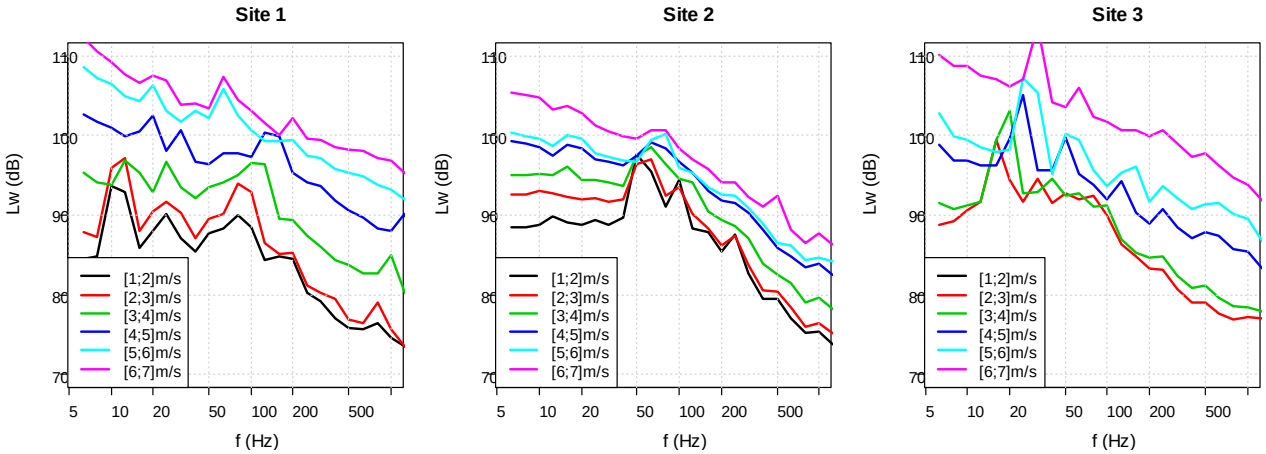


Figure 61 : spectres de puissance acoustique (L50) médians[63], en fonction de la vitesse du vent.

Hormis pour les faibles vitesses de vent (inférieures à 4 m/s), les spectres présentent une forme quasi linéaire selon le logarithme de la fréquence, avec une pente négative des basses fréquences vers les hautes fréquences. Cette tendance quasi linéaire est d'autant plus marquée que les vitesses de vent sont importantes. Pour les vitesses les plus élevées, les taux de décroissance observés sont de l'ordre de -2 dB par octave (Figure 62), alors que la valeur de -4 dB/octave est rencontrée dans la littérature (Botha 2013, Møller et Pedersen 2011, Tachibana *et al.* 2014).

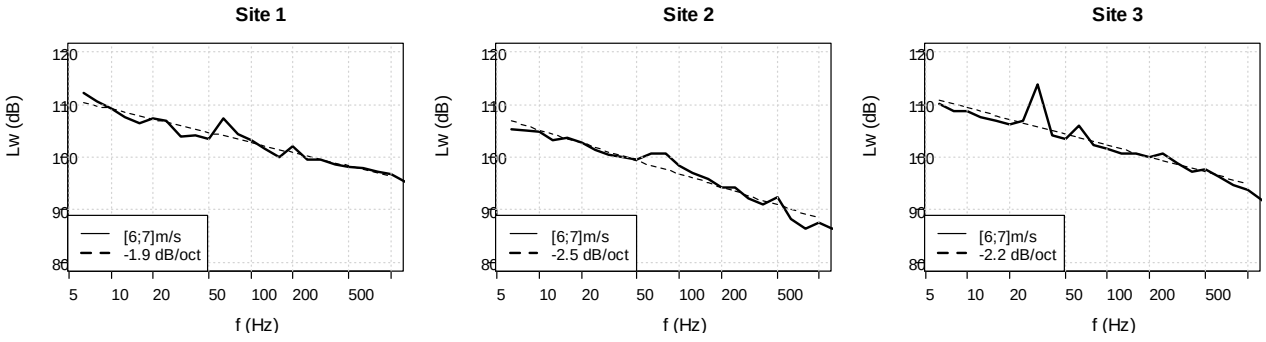


Figure 62 : spectres de puissance acoustique médians pour les plus fortes conditions de vent rencontrées (traits pleins). Vitesse de vent à 10 m : [6-7] m/s

5.2.1 Spectres et niveaux sonores à différentes distances

Pour chaque site, les niveaux sonores ont été mesurés à deux distances de l'éolienne la plus proche d'un riverain : à 500 m et, et à environ 900 m en façade de l'habitation.

63 Les spectres médians sont calculés à partir de la médiane des niveaux sonores pour chaque tiers d'octave.

Contribution des éoliennes au bruit mesuré

Afin de s'assurer que les niveaux sonores relevés sont bien imputables aux éoliennes, des études de corrélations entre les niveaux sonores mesurés et le niveau de puissance acoustique de l'éolienne ont été menées.

Site 1 et site 3

Les coefficients de corrélations sont élevés aussi bien à 500 m qu'au niveau du riverain (cf. Figure 63 et Figure 64). Des corrélations significatives existent également entre les niveaux de bruit mesurés et la vitesse du vent à 10 m de hauteur. Ceci se conçoit bien dans la mesure où l'émission sonore de l'éolienne apporte une contribution significative au bruit mesuré et que celle-ci dépend de la vitesse du vent ; mais le fait que les corrélations avec la vitesse du vent soient inférieures à celles avec l'émission sonore de l'éolienne tend à indiquer de plus que l'éolienne contribue davantage au bruit mesuré que le bruit du vent seul. Pour le site 3, la corrélation des niveaux IBF et l'émission IBF de l'éolienne est modérée ce qui pourrait laisser penser que les niveaux IBF en ces points ne proviennent pas uniquement de l'éolienne.

Une analyse de corrélation similaire, mais réalisée de façon fréquentielle (voir Annexe 6) indique que les spectres mesurés à 500 m et à l'extérieur chez le riverain sont relativement bien corrélés avec le spectre d'émission sonore de l'éoliene. Pour les infrasons et basses fréquences, cette corrélation a tendance à augmenter avec la vitesse de vent.

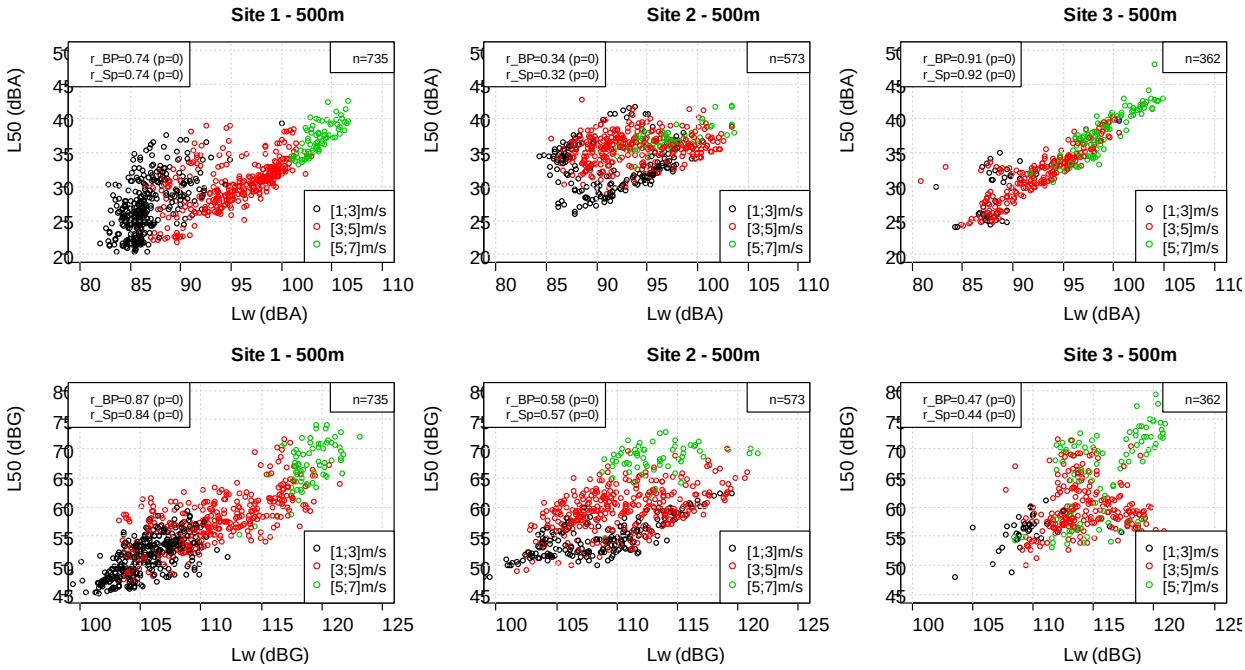
Site 2

Le coefficient de corrélation entre les bruits mesurés à 500 m et l'émission sonore de l'éolienne est faible (inférieur à 0,5), aussi bien pour les niveaux audibles que pour les infrasons et basses fréquences. Le fait que le coefficient de corrélation entre le niveau de bruit mesuré à 500 m et la vitesse du vent soit plus élevé indique que le bruit du vent a masqué le bruit de l'éolienne pour ce site.

Le même constat est effectué au niveau du bruit mesuré chez le riverain, où de plus la présence de bruit local non imputable à l'éolienne a probablement masqué le bruit de l'éolienne.

Le même type de constat et de conclusion est observé pour l'analyse de corrélation réalisée de façon fréquentielle entre les spectres mesurés et le spectre d'émission sonore de l'éolienne (voir Annexe 6).

Pour les raisons évoquées ci-dessus, et afin de ne pas biaiser les comparaisons, les résultats du site 2 (où la contribution du bruit d'éolienne est masquée) ne seront pas comparés par la suite aux résultats des sites 1 et 3 (où la contribution du bruit d'éolienne est constatée).

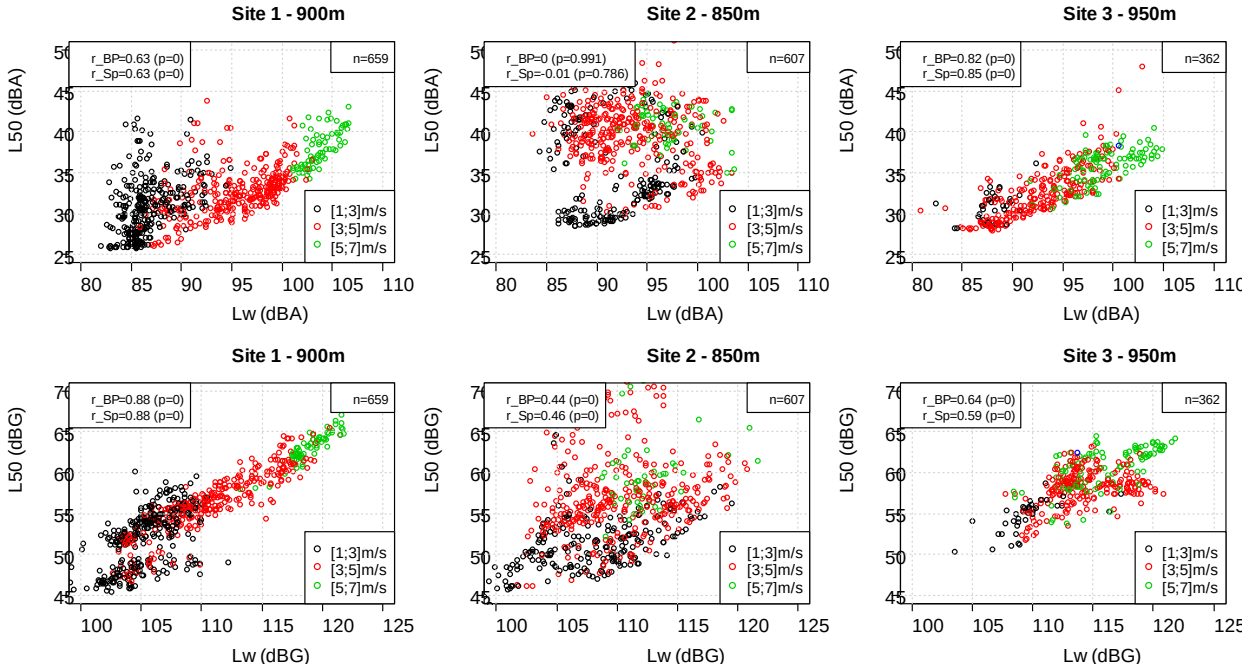


Avec r_BP et r_Sp : coefficient de corrélation linéaire et coefficient de corrélation de Spearman

P : p-valeur du test de corrélation

N : nombres d'échantillons

Figure 63 : niveau sonore à 500 m de l'éolienne (L_{50}) en fonction du niveau de puissance de l'éolienne (L_W), exprimés en dBA (haut) et en dBG (bas).

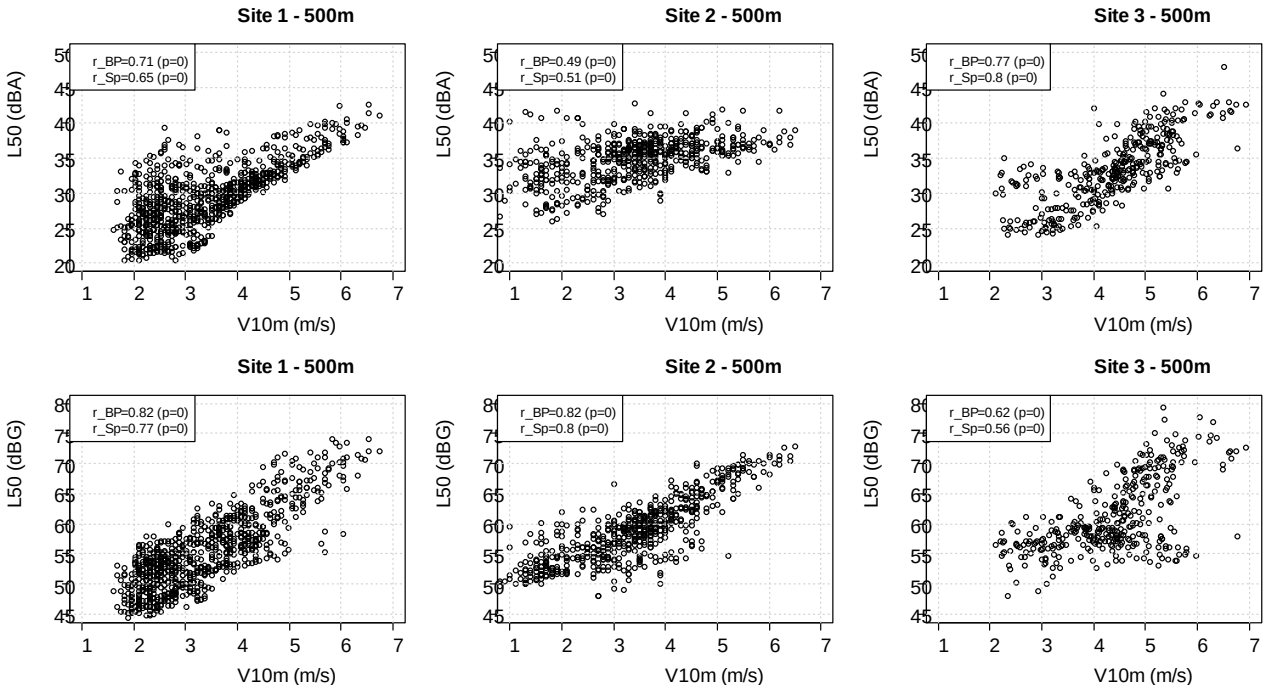


Avec r_BP et r_Sp : coefficient de corrélation linéaire et coefficient de corrélation de Spearman

P : p-valeur du test de corrélation

N : nombres d'échantillons

Figure 64 : niveau sonore à l'extérieur du logement d'un riverain (L_{50}) en fonction du niveau de puissance de l'éolienne (L_W), exprimés en dBA (haut) et en dBG (bas).

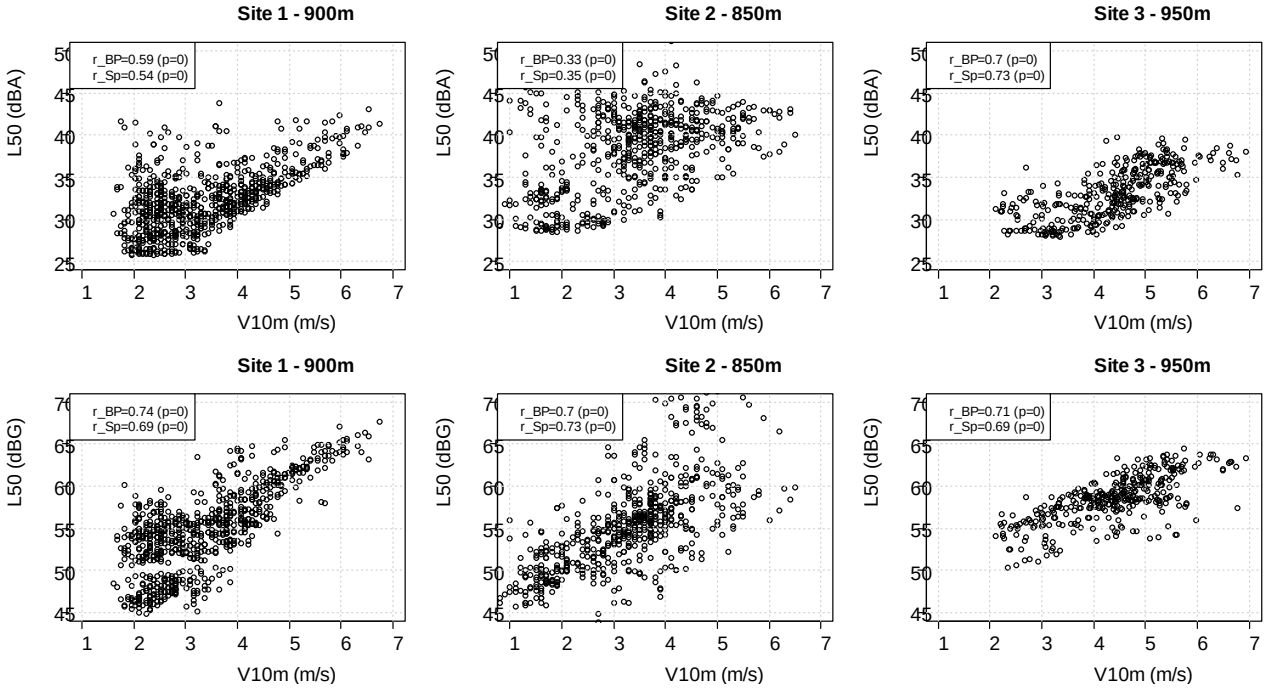


Avec r_BP et r_Sp : coefficient de corrélation linéaire et coefficient de corrélation de Spearman

P : p-valeur du test de corrélation

N : nombres d'échantillons

Figure 65 : niveau sonore à 500 m de l'éolienne (L_{50}) en fonction de la vitesse du vent à 10 m, exprimé en dBA (haut) et en dBG (bas).



Avec r_BP et r_Sp : coefficient de corrélation linéaire et coefficient de corrélation de Spearman

P : p-valeur du test de corrélation

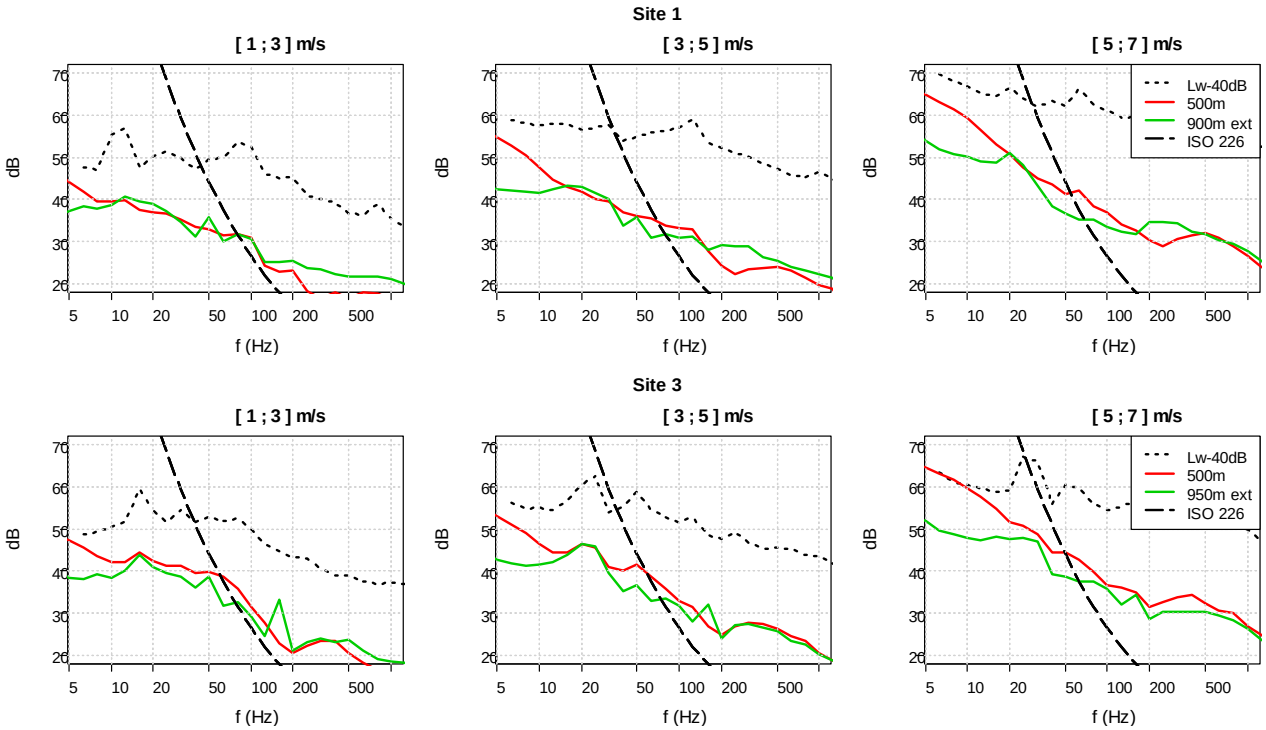
N : nombres d'échantillons

Figure 66 : niveau sonore à l'extérieur du logement du riverain (L_{50}), en fonction de la vitesse du vent à 10 m, exprimé en dBA (haut) et en dBG (bas).

Spectres mesurés à différentes distances

La comparaison de la forme des spectres mesurés à 500 m et au niveau des habitations à la forme du spectre d'émission des éoliennes (Figure 67) révèle des contributions fréquentielles attribuables aux éoliennes (bosse à 63 Hz par exemple). Les tiers d'octave des infrasons et basses fréquences sonores mesurés à chaque point sont bien corrélés avec ceux du spectre d'émission (voir Annexe 7). On constate une augmentation des niveaux sonores des IBF avec la vitesse de vent. Pour les 2 sites, pour les faibles vitesses de vent, les spectres sont sensiblement les mêmes entre les points à 500 m et les points de mesure au niveau des riverains, ce qui tend à indiquer que ces spectres sont davantage représentatifs du bruit local du site que du bruit des éoliennes. Lorsque la vitesse de vent augmente, le niveau sonore à 500 m tend à être supérieur à celui mesuré au niveau du riverain ; ceci s'explique par la contribution plus importante du bruit de l'éolienne au niveau du point le plus proche.

Compte tenu des niveaux sonores mis en jeu, on constate que pour les vitesses de vent les plus élevées qui ont été mesurées (6 à 7 m/s), la plus petite fréquence audible à 500 m des éoliennes est d'environ 50 Hz. Au niveau des habitations, le niveau sonore étant plus faible, cette fréquence est aux alentours de 60 Hz pour les mêmes conditions.

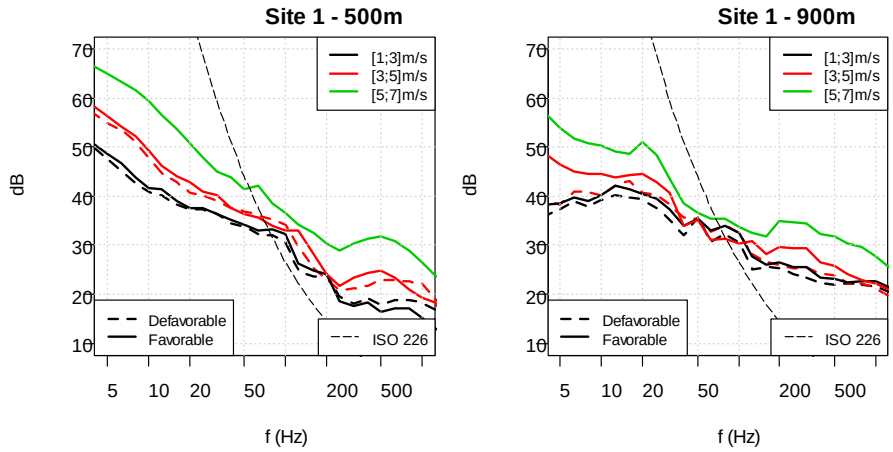


Seuil d'audition ISO 226 (tirets noirs), spectre de puissance de l'éolienne – 40 dB (pointillés).

Figure 67 : médianes des spectres à 500 m (rouge) et à l'extérieur de l'habitation (vert)

Compte tenu des conditions météorologiques rencontrées sur site, on ne constate pas une influence sur les conditions de propagation très significative à 500 m. À 900 m, une augmentation des niveaux sonores est constatée lors de conditions favorables à la propagation et pour des vitesses de vent à 10 m comprise entre 3 et 5 m/s. Cette augmentation est en particulier visible en dessous de 20 Hz.

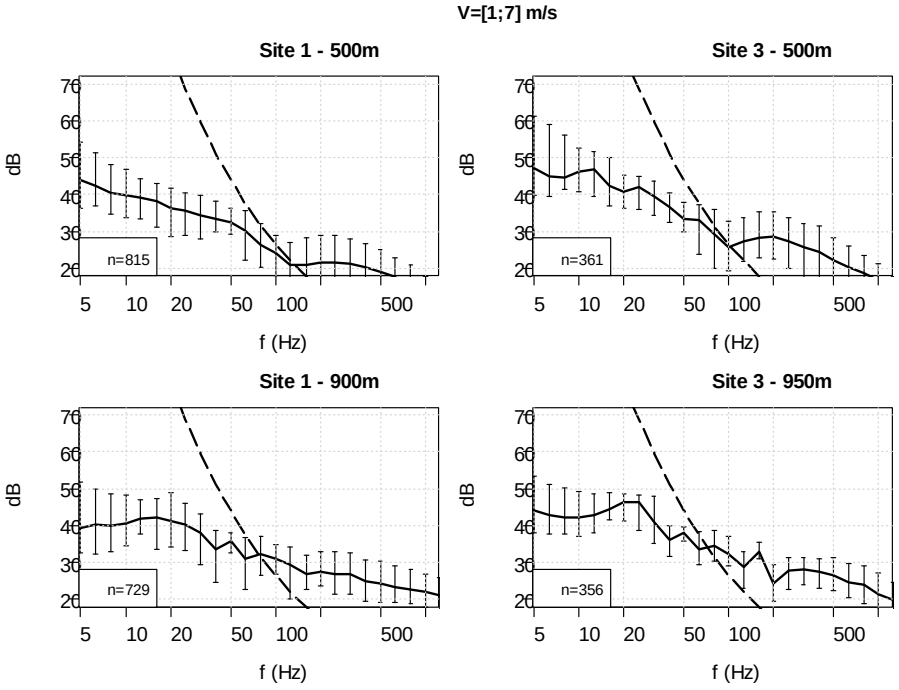
Il faut cependant noter que ces constats ne portent que sur des vitesses de vent peu élevées (jusqu'à 5 m/s), et qu'aucune comparaison n'a pu être effectuée pour des vitesses plus élevées dans la mesure où aucune condition de propagation défavorable n'a été rencontrée lors de la campagne de mesure pour des vitesses supérieures à 5 m/s.



Tirets fins noirs : seuil d'audition ISO 226.

Figure 68 : spectre des niveaux sonores à 500 m et 900 m, en fonction des classes de vitesse de vent à 10 m et des conditions de propagation.

Toutes conditions de vent et toutes conditions de propagation confondues, les spectres présentent une dispersion importante qui va de 10 à 20 dB (Figure 69). Ces ordres de grandeur de dispersion sont similaires avec ce qui est rapporté dans la littérature pour des contextes similaires (voir par exemple (Evans, Cooper, et Lenchine 2013)).

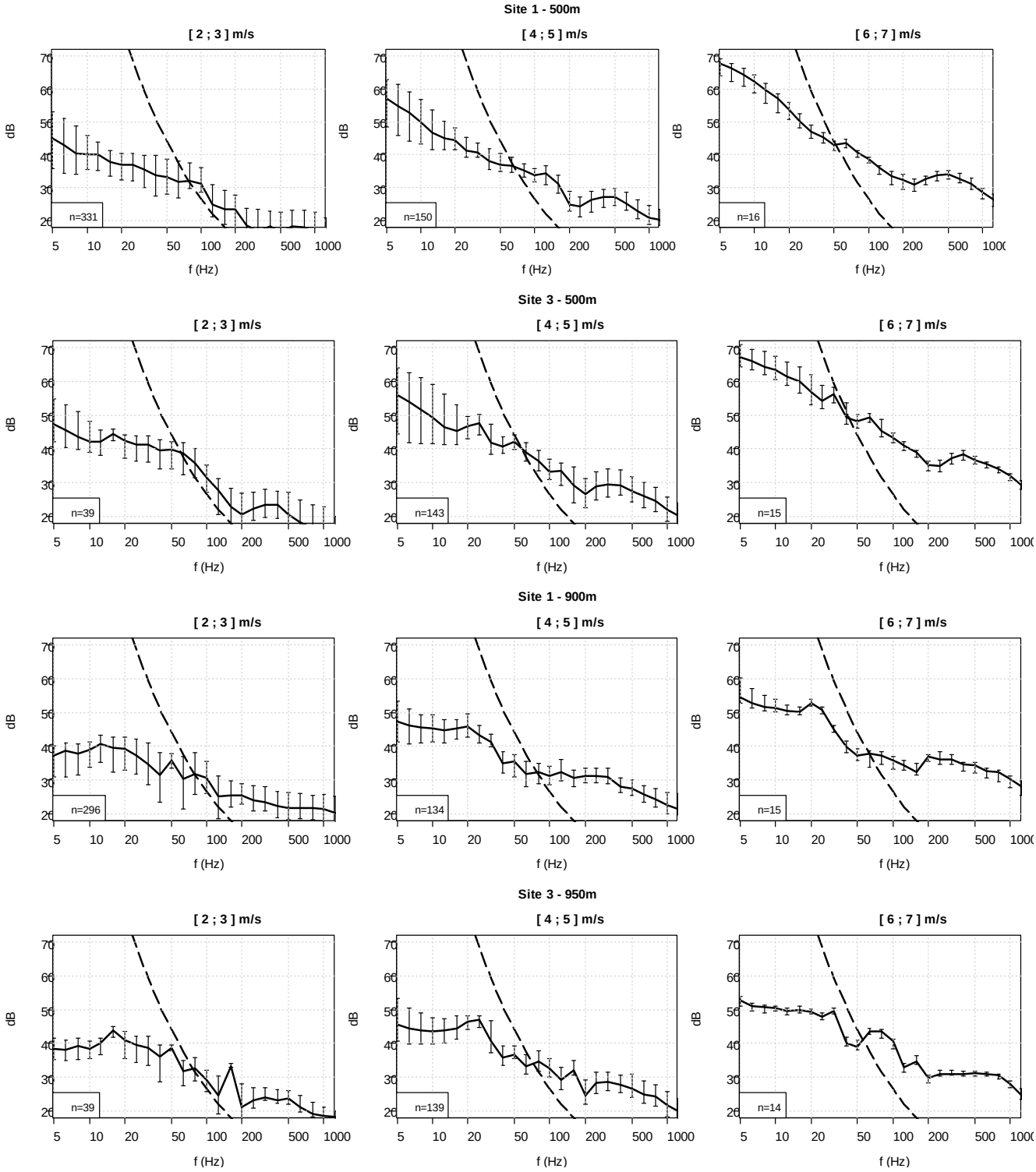


Seuil d'audition ISO 226 (tirets noirs). Barres verticales : intervalles contenant 75 % des échantillons autour de la médiane des niveaux sonores de chaque tiers d'octave.

Figure 69 : spectres médians et dispersion associée, toutes conditions de vent et de propagation confondues

Cette dispersion importante est en particulier due à la grande variété des conditions de vent rencontrées. Si l'on considère à présent différentes classes de vent, on constate que les dispersions les plus importantes sont observées pour les vitesses de vent les plus faibles (Figure 70). Ceci est en partie dû à une contribution du bruit local du site au bruit mesuré pour ces gammes de vitesses, pour lesquelles l'éolienne émet moins de bruit. La dispersion des spectres

est plus importante dans la partie IBF (de l'ordre de 10 dB) que pour les fréquences plus élévées (de l'ordre de 5 dB) (Figure 70). La dispersion est moins importante pour les vitesses de vent les plus fortes (de l'ordre de quelques décibels).



Seuil d'audition ISO 226 (tirets noirs). Barres verticales : intervalles contenant 75 % des échantillons autour de la médiane des niveaux sonores de chaque tiers d'octave.

Figure 70 : spectres médians à 500 m et à 900 m/950 m, et dispersion associée, pour les sites 1 et 3, en fonction de la vitesse du vent.

5.2.2 Spectres à l'intérieur des bâtiments

▶ Isolement sonore de la façade du bâtiment

Les isolements bruts mesurés sont représentés sur la Figure 71. On retrouve un résultat bien connu : plus la fréquence est basse, moins la façade atténue le bruit provenant de l'extérieur, jusqu'à atteindre une transparence totale pour les bruits de très basse fréquence.

Des creux dans l'isolement acoustique apparaissent à certaines fréquences, par exemple aux tiers d'octave 4 Hz, 8 Hz, 25 Hz et 50 Hz pour le site 1. Ces creux ont deux causes possibles (Hansen, Hansen, et Zajamšek 2015). La première provient de la résonnance possible du volume d'air dans la pièce qui se traduit par une augmentation du niveau sonore à certaines fréquences et conduit donc à une baisse de l'isolement apparent de la façade. Ces fréquences de résonnance peuvent être déterminées avec les dimensions de la pièce (Hansen, Hansen, et Zajamšek 2015), et l'on trouve la première fréquence de résonnance aux alentours de 50 Hz pour la pièce du site 1. La deuxième cause est la mauvaise atténuation des parois de la façade à certaines fréquences. Ces fréquences peuvent être déterminées en fonction de la composition et de la structure de la paroi, et concernent ici les tiers d'octave 4 Hz, 8 Hz et 25 Hz. Ces résultats d'isolement dans le domaine des infrasons et basses fréquences sonores sont similaires à ceux présentés par Hansen *et al.* (Hansen, Hansen, et Zajamšek 2015).

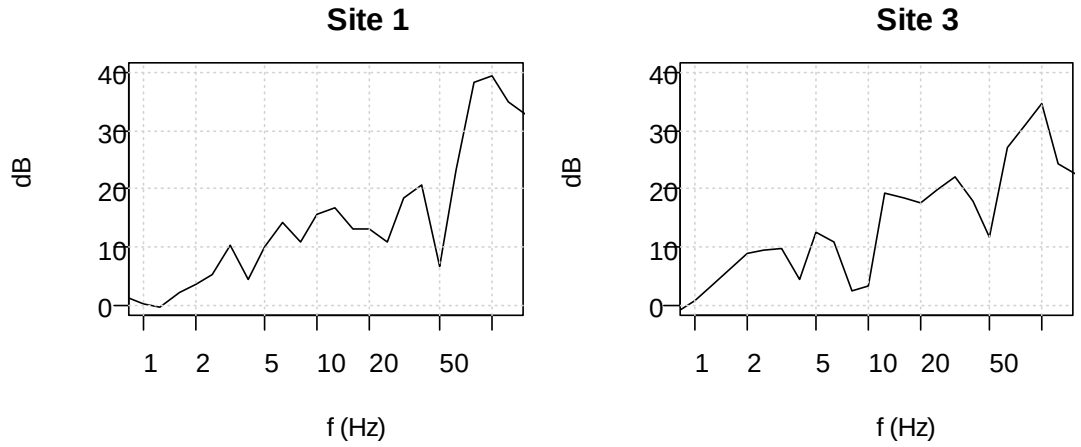


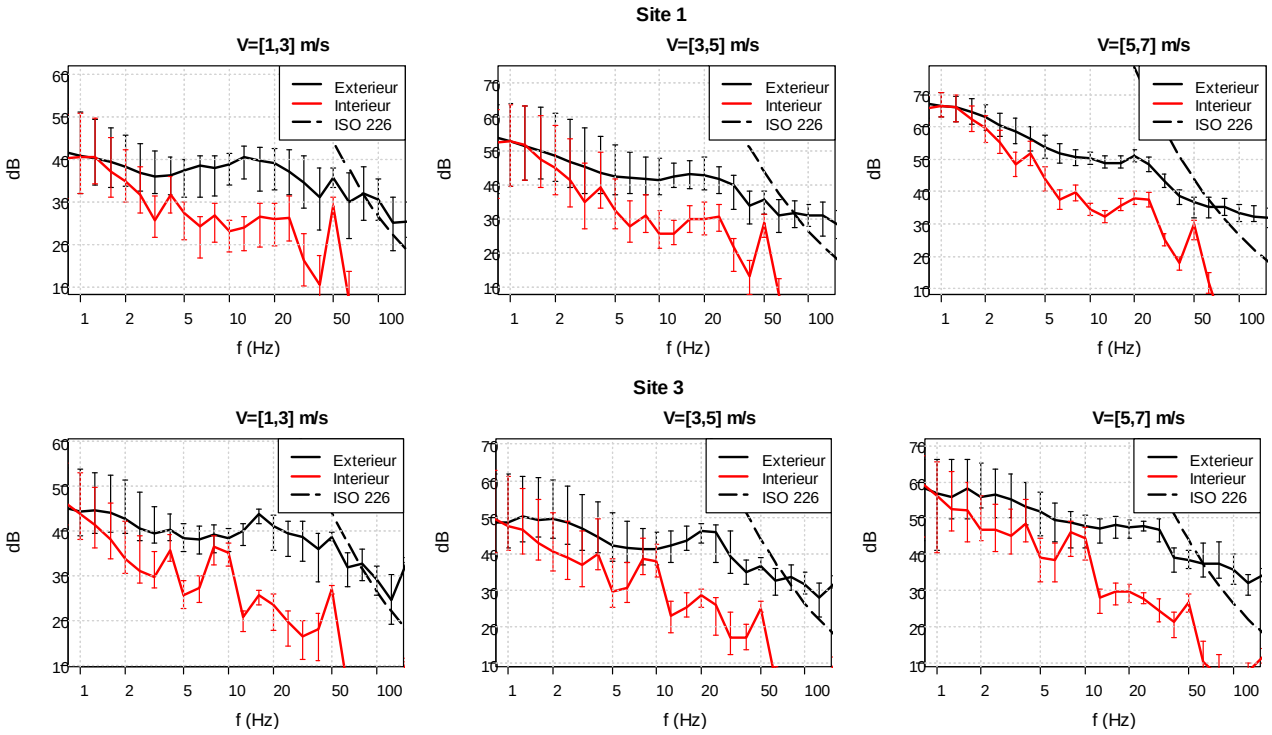
Figure 71 : isolement brut de la façade des bâtiments

▶ Spectres

Une comparaison entre les spectres mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du logement est représentée sur la Figure 72.

Pour les deux sites, on constate que les très basses fréquences ne sont pas atténuées par la façade, puis que les niveaux sonores intérieurs chutent très rapidement avec la fréquence pour atteindre des niveaux assez faibles à partir de 20 Hz. Les bosses visibles vers les tiers d'octave 4 Hz, 8 Hz et 25 Hz uniquement à l'intérieur, sont dûes aux caractéristiques de l'isolement de la façade (voir ci-dessus) qui atténue moins le bruit à ces fréquences. Bien qu'également visible sur le spectre à l'extérieur du bâtiment, la bosse à 50 Hz visible sur le spectre à l'intérieur du bâtiment est due à une amplification par résonnance du bruit dans la pièce.

Le bruit intérieur dans le domaine des infrasons et basses fréquences sonores augmente avec la vitesse du vent, en suivant l'augmentation du bruit IBF à l'extérieur. On constate que les IBF mesurés à l'intérieur se situent en dessous des seuils d'audibilité jusqu'aux alentours de 50 à 100 Hz.



Seuil d'audition ISO 226 (tirets noirs). Barres verticales : intervalles contenant 75 % des échantillons autour de la médiane des niveaux sonores de chaque tiers d'octave

Figure 72 : spectres médians à l'extérieur (noir) et à l'intérieur (rouge) du logement

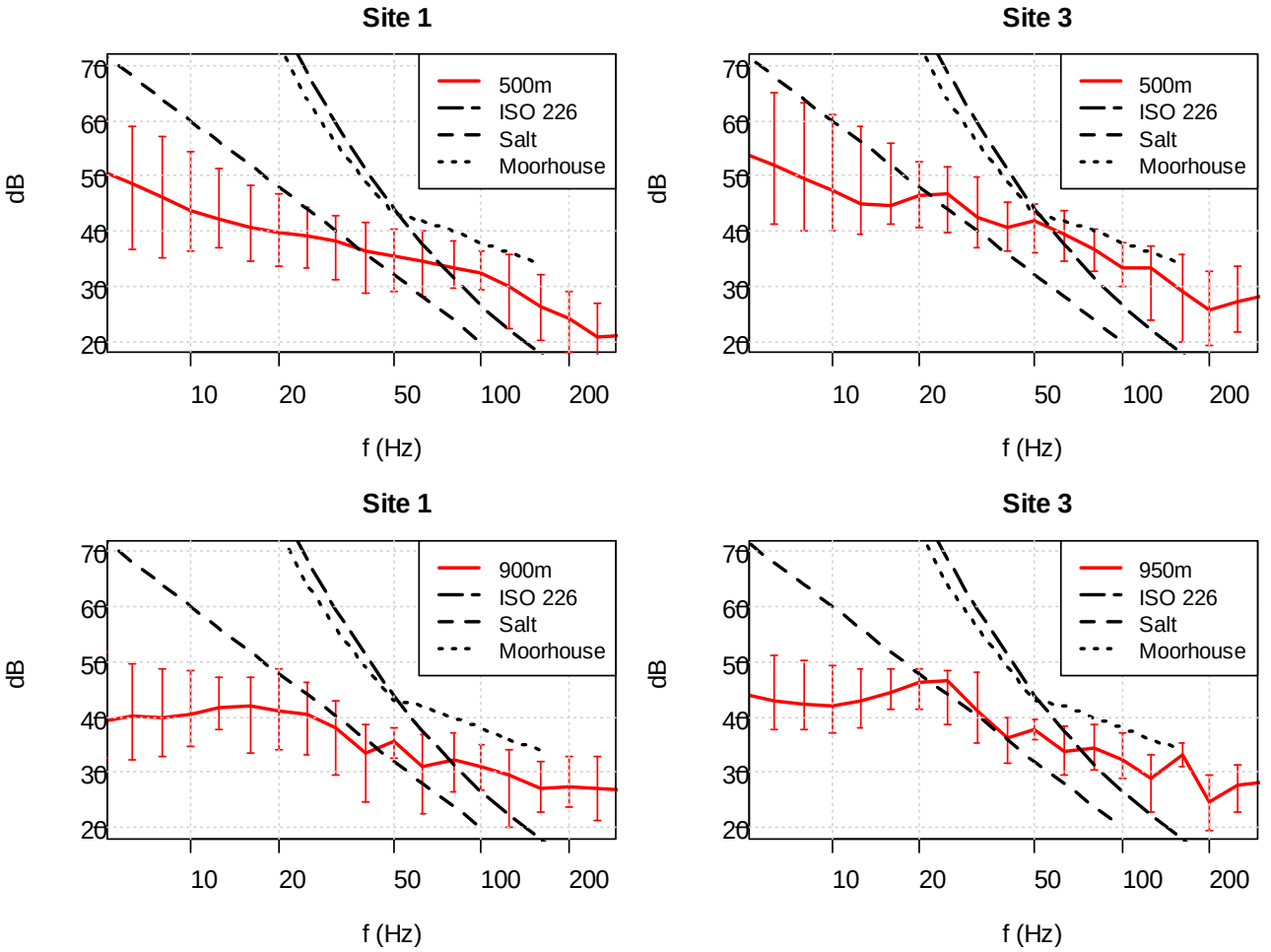
5.2.3 Comparaison à des seuils

Les spectres mesurés à 500 m (distance minimale d'éloignement réglementaire des éoliennes par rapport aux habitations) et à l'extérieur du logement des riverains sont comparés à trois types de seuil :

- le premier seuil correspond au seuil d'audibilité fourni par la norme ISO 226 : les fréquences pures dont le niveau sonore est supérieur à ce seuil peuvent être audibles, tandis que celles dont le niveau sonore est inférieur à cette courbe ne le sont pas ;
- le deuxième type de seuil correspond au critère de gêne liée à la présence d'infrasons et basses fréquences sonores décrit par Moorhouse (Moorhouse, Waddington, et Adams 2009). Ce critère a été établi en considérant des enquêtes, des mesures *in situ*, ainsi que des mesures en laboratoire. Il permet d'apprécier si un bruit IBF peut, selon les auteurs, entraîner une gêne. Pusieurs courbes sont proposées dans ces travaux, le critère utilisé ici est celui correspondant aux seuils les plus contraignants et qui correspondent au cas d'une exposition nocturne (Moorhouse, Waddington, et Adams 2009) *;*
- le troisième type de seuil est celui établi par Salt et Hullar (Salt et Hullar 2010). Ce seuil correspond aux niveaux au-delà desquels les cellules cillées externes du système auditif peuvent présenter une activation (voir § 6.3.2). Le dépassement de ce seuil, qui témoigne de la réaction positive d'un récepteur physiologique, ne permet cependant pas de préjuger, à l'heure actuelle, de quelconques effets potentiels sur la santé..

La Figure 73 présente les spectres médians de l'ensemble des mesures relevées (toutes conditions de vent confondues), accompagnés de leur dispersion, pour les sites 1 et 3, ainsi que les 3 types de seuils. On constate une dispersion importante dans la gamme des infrasons et basses fréquences sonores pouvant atteindre 20 dB en très basse fréquence. La quasi-totalité des niveaux sonores de la gamme des IBF sont en dessous de la courbe d'audibilité, les premières fréquences audibles se situant autour de 50 Hz. De même, que ce soit au niveau des riverains ou

à 500 m, la quasi-totalité des spectres ne dépasse pas le seuil de Moorhouse *et al*. Le seuil de Salt et Hullar est dépassé pour des fréquences supérieures à 20 Hz, indiquant ainsi , selon les hypothèses de Salt et Hullar, une activation possible des cellules cillées externes pour des fréquences supérieures à 20 Hz.



Barres verticales : intervalles contenant 75 % des échantillons autour de la médiane des niveaux sonores de chaque tiers d'octave

Figure 73 : comparaison des spectres médians (rouge) aux seuils d'audibilité (ISO 226), au seuil de Salt et au seuil de Moorhouse.

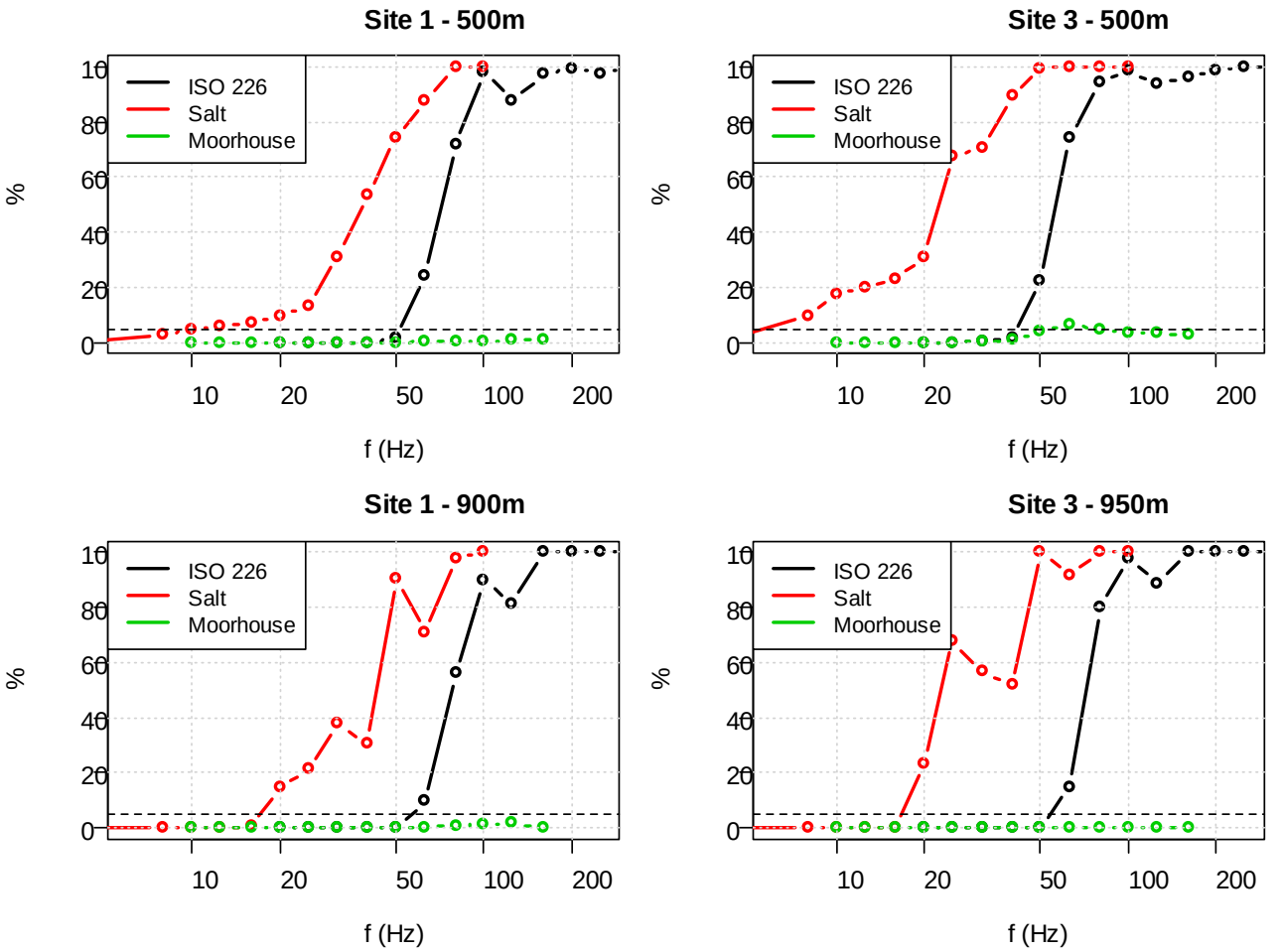


Figure 74 : pourcentages de temps de dépassement des seuils constatés lors de la campagne de mesure, pour chaque tiers d'octave

La Figure 74 présente la fréquence des dépassements qui peuvent être constatés. Le critère de gêne en infrasons et basses fréquences sonores de Moorhouse *et al.* n'est quasiment jamais dépassé (les rares dépassements constatés ont lieu sur le site 3, moins de 5 % du temps, et seules les fréquences supérieures à 50 Hz sont concernées).

Les niveaux sonores des fréquences en dessous de 50 Hz dépassent les seuils d'audition moins de 5 % du temps pour les deux sites, les fréquences inférieures à 20 Hz ne présentent aucun dépassement des seuils d'audition, aussi bien à 500 m ou au niveau des riverains. Les IBF sont donc toutjours inaudibles à ces emplacements.

À 500 m, la courbe de Salt et Hullar présente des dépassements pendant plus de 5 % du temps pour des fréquences supérieures à 5 Hz. Au niveau des riverains (900 et 950 m) ces dépassements pendant plus de 5 % du temps sont observés pour des fréquences supérieures à 20 Hz.

5.2.4 Comparaison des niveaux en dBA et en dBG

La variation du spectre du bruit d'une éolienne ayant la particularité de dépendre linéairement avec le logarithme de la fréquence (pente constante décroissante en dB/oct, voir § 4.2.1.3 et Figure 62), le contenu des IBF est proportionnel au contenu des fréquences audibles. Lorsque le bruit de l'éolienne contribue de façon significative, cette spécificité permet d'établir une relation théorique simple entre les niveaux exprimés en dBG et ceux exprimés en dBA, indépendamment du niveau sonore :

$$dBG = dBA + 4.9\,p + 5.4$$

où p est l'opposé de la pente (en dB/oct) du spectre d'émission de l'éolienne.

Afin de vérifier la validité de cette relation, une comparaison entre les niveaux en dBG et ceux exprimés en dBA est réalisée sur la Figure 75, pour des vitesses de vent où la contribution du bruit de l'éolienne est suceptible d'être significative (vitesse du vent à 10 m supérieure à 3 m/s). On constate une bonne corrélation entre les niveaux en dBG et ceux en dBA (Figure 75), ainsi qu'un accord satisfaisant entre la relation estimée et la forme de la relation théorique.

Les coefficients obtenus expérimentalement (Figure 75) sur les points à 500 m (sites 1 et 3) et en façade de l'habitation du riverain (site 1) correspondraient cependant davantage à une pente de p= -4 dB/oct qu'à ceux estimés à l'aide la pente p=-2 dB/oct, (cf. Figure 62). Les coefficients obtenus pour le point de mesure chez le riverain du site 3 diffèrent de ceux obtenus à partir des autres points, laissant à nouveau à penser que l'éolienne ne serait pas la seule source contribuant aux IBF en ce point.

La relation établie entre les dBA et les dBG présente un intérêt pratique : elle indique qu'il est possible d'obtenir des informations sur le contenu en infrasons et basses fréquences sonores d'un bruit éolien à partir d'une mesure réalisée en dBA (sous réserve que la contribution du bruit de l'éolienne dans le bruit mesuré soit significative). Ce type de résultat est en accord avec ce qui a été trouvé et mentionné dans le cadre de l'étude récente de Santé Canada (MG_Acoustics 2014b, a).

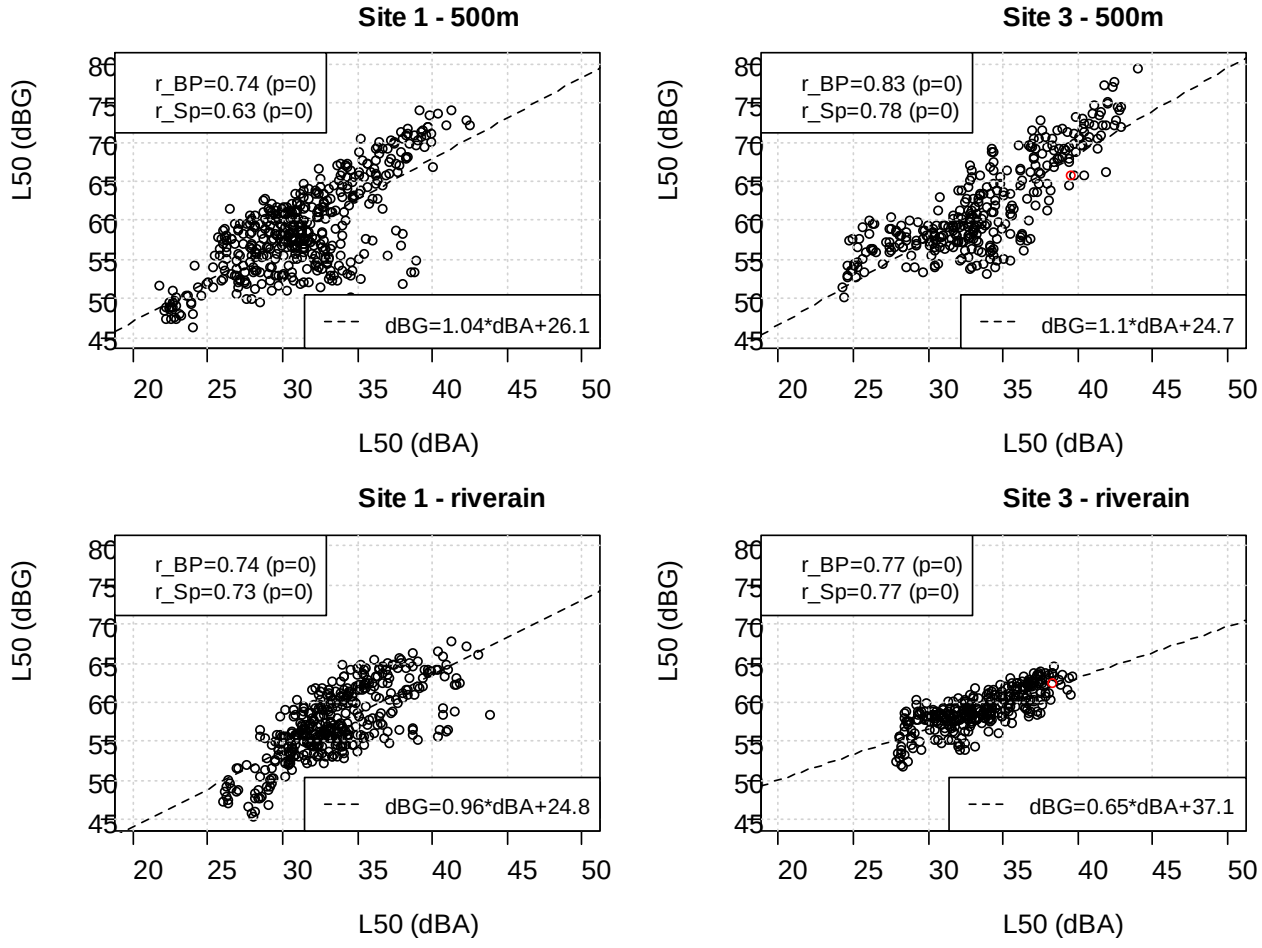


Figure 75 : corrélations entre les niveaux sonores estimés en dBG et les niveaux sonores estimés en

5.3 Synthèse des campagnes expérimentales

Pour les trois sites, la forme des spectres d'émission des éoliennes est similaire et présente une forme linéaire décroissante selon le logarithme de la fréquence, avec un contenu en infrasons et basses fréquences sonores dominant et la présence de pics plus ou moins marqués qui sont probablement d'origine mécanique (machinerie dans la nacelle par exemple). L'amplitude des spectres d'émission croît quasi linéairement avec la vitesse du vent, jusqu'à théoriquement atteindre un plateau qui n'a pas pu être mis en évidence par absence de vent suffisamment fort durant la période d'observation. L'ensemble de ces observations est en accord avec ce qui est rapporté dans la littérature. Seule la valeur des pentes de spectre observées est un peu plus faible que celle rencontrée dans la littérature.

Contrairement aux sites 1 et 3, il n'a pas été possible de montrer pour le site 2 que le bruit éolien contribuait de manière significative au bruit mesuré à grande distance. Hormis pour le site 2, les niveaux sonores des infrasons et basses fréquences des spectres mesurés à grande distance (500 m et à environ 900 m en façade des bâtiments des riverains) sont mieux corrélés avec l'émission IBF des éoliennes que ne le sont les niveaux sonores des fréquences plus élevées. Ceci s'explique par l'effet de l'atténuation atmosphérique qui agit davantage sur les hautes fréquences avec la distance, et qui a un effet négligeable sur les IBF aux distances considérées dans cette étude.

Il n'a pas été observé d'influence significative des conditions météorologiques sur les conditions de propagation pour les points éloignés de 500 m et 900 m. Cette constatation est cependant à relativiser dans la mesure où les conditions météorologiques rencontrées lors des mesures n'ont pas permis d'observer chacune des deux grandes conditions de propagation (favorable et défavorable) pour toutes les classes de vent considérées et que les comparaisons n'ont pu être effectuées que sur des vitesses de vent peu élevées.

On observe une dispersion importante des spectres et des niveaux sonores relevés à grandes distances, celle-ci pouvant atteindre plus de 10 dB en basse fréquence. Cette dispersion importante étant présente essentiellement pour les faibles vitesses de vent, il est probable qu'elle soit en partie due au bruit local du site qui ne serait pas masqué par la contribution des éoliennes pour ces vitesses de vent.

Les spectres mesurés au niveau des riverains sont rarement au dessus des seuils d'audibilité pour ce qui concernent les infrasons et basses fréquences sonores. Les premières fréquences audibles, plus de 5 % de la période d'observation, sont supérieures à 50 Hz. Le critère de gêne IBF de Moorhouse *et al.* n'est quasiment jamais dépassé (les rares dépassements constatés ont lieu sur le site 3 moins de 5 % du temps et seules quelques fréquences de 50 à 100 Hz, limite du domaine des IBF, sont concernées). La courbe de Salt et Hullar est dépassée pendant plus de 5 % du temps pour des fréquences supérieures à 5 Hz à 500 m, et supérieures à 20 Hz au niveau des riverains, indiquant ainsi une activation possible des cellules cillées externes par ces fréquences[64] (sans préjuger toutefois d'effets sanitaires potentiels).

Les mesures effectuées à l'intérieur des bâtiments des riverains dans une pièce faisant face aux éoliennes indiquent des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores assez faibles et inaudibles. Les caractéristiques des isolements phoniques des bâtiments aux fréquences IBF montrent un isolement acoustique brut qui diminue lorsque les fréquences diminuent, jusqu'à atteindre une transparence acoustique quasi totale aux très basses fréquences. Dans le domaine IBF, on note également des diminutions ponctuelles de l'isolement à certaines fréquences. Celles-ci peuvent être dues soit aux caractéristiques mécaniques des parois de la façade (pour les fréquences IBF les plus basses), soit à un phénomène de résonance du volume d'air de la pièce qui peut apparaitre à des fréquences du haut du spectre IBF (vers 50 Hz pour les pièces

[64] Voir § 2.5.3 et § 6.3.2.2.

considérées). Ces résultats sont en accord avec des résultats de la littérature concernant ces domaines de fréquences (Hansen, Hansen, et Zajamšek 2015).

Une corrélation significative a été observée entre les niveaux sonores globaux pondérés G et A de bruits où la contribution des éoliennes était significative. Ceci est d'un intérêt pratique très intéressant, car cela indique que des informations pertinentes concernant le niveau d'IBF présent dans un bruit éolien pourraient être obtenues à partir de résultats de mesures estimés en dBA à partir d'un matériel acoustique « standard ».

Ces expérimentations ont mis en évidence une difficulté à déterminer si le bruit des éoliennes contribue de façon significative aux bruits mesurés à grande distance. Ceci est d'autant plus vrai pour les IBF qui ne sont pas audibles. Hormis les calculs de corrélations effectués dans cette étude, mais qui peuvent cependant avoir une portée limitée, il serait nécessaire de mettre en œuvre des analyses complémentaires qui n'ont pas pu être réalisées dans le cadre de ces campagnes :

- une première analyse consisterait à observer si des cycles marche/arrêt des éoliennes sont également visibles dans les signaux mesurés à grande distance[65] ;
- une deuxième analyse intéressante consisterait à suivre la procédure présentée par Zajamšek *et al*..(Zajamšek *et al.* 2016), qui consiste à observer si l'on retrouve des raies de très basses fréquences, caractéristiques du bruit éolien, dans le spectre mesuré. Ceci nécessite de mettre en œuvre des analyses spectrales plus détaillées.

[65] Le protocole de mesure n'avait pas retenu cette procédure car cela aurait nécessité l'intervention de l'exploitant des parcs éoliens, ce qui avait été exclu intialement afin d'éviter tout biais potentiel dans l'étude.

Synthèse du chapitre 5 : exposition aux basses fréquences et infrasons des éoliennes

Le groupe de travail a piloté des campagnes de mesures de bruit (incluant basses fréquences et infrasons) à proximité de plusieurs parcs éoliens. Ces travaux avaient pour objectif de documenter les expositions sonores dues aux éoliennes, en particulier pour les basses fréquences et infrasons, par des mesures dans plusieurs situations jugées clés et de les comparer aux données disponibles dans la littérature scientifique.

Ces mesurages acoustiques, réalisés par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) ont été effectués pour trois parcs éoliens. Pour chacun de ces parcs, le protocole expérimental comprenait l'installation de 3 à 4 points de mesures acoustiques et de 1 point de mesure météorologique pendant une durée d'une semaine :

- à proximité de l'éolienne afin d'estimer son émission acoustique ;
- à une distance de 500 m de l'éolienne la plus proche d'un riverain (distance réglementaire minimale d'éloignement des habitations) ;
- en façade et à l'intérieur de l'habitation d'un riverain (à environ 900 m de l'éolienne).

► **Conclusions issues des campagnes de mesures**

- les éoliennes sont des sources de bruit dont la part des infrasons et basses fréquences sonores prédomine dans le spectre d'émission sonore. D'après la littérature scientifique, ces composantes IBF augmentent avec la taille de l'éolienne ;
- les résultats des mesures de l'émission sonore des éoliennes confirment les tendances observées dans la littérature scientifique :
    - la forme générale du spectre d'émission du bruit éolien (décroissance quasi linéaire du niveau sonore avec le logarithme de la fréquence) est retrouvée sur tous les sites avec peu de différences notables. Quelques raies fréquentielles, probablement attribuables au bruit mécanique dans la nacelle, ont été relevées dans la partie IBF du spectre ;
    - plus la vitesse de vent augmente, plus l'émission sonore IBF augmente, le maximum théorique n'ayant pas pu être observé lors des campagnes de mesure (faute de vitesses de vent suffisamment élevées).
- les résultats des mesures de niveaux sonores à 500 m et 900 m (riverain) confirment les tendances observées dans la littérature scientifique pour 2 sites sur 3 [66] :
    - une forte dispersion des mesures en fonction du temps pour un parc éolien et un régime de vent donné. D'autres facteurs difficilement contrôlables (turbulence ponctuelle du vent, contamination par d'autres sources sonores, etc.) peuvent avoir une influence non négligeable sur le bruit mesuré ;
    - aucun dépassement des seuils d'audibilité pour des domaines de fréquences IBF n'a été constaté (< 50 Hz) ;
    - des niveaux sonores dépassant ponctuellement[67] la courbe théorique de Salt *et al.* ont été observés à l'extérieur des habitations, pour des fréquences inférieures à

[66] La contribution sonore des éoliennes au niveau du riverain du site 2 n'a pas pu être établie du fait de la contribution importante du bruit local qui masque le bruit des éoliennes.

20 Hz. D'après ces auteurs, le dépassement de ces niveaux sonores serait susceptible de générer une stimulation nerveuse au niveau de l'appareil cochléovestibulaires. Des travaux seraient à conduire pour valider cette hypothèse (voir § 6.3.2) ;

- les infrasons et basses fréquences sonores mesurés à l'intérieur des habitations, dans des conditions où les éoliennes fonctionnaient avec les vitesses de vent les plus élevées rencontrées au cours des mesures (6 à 7 m/s[68]), sont inférieurs au seuil d'audibilité (ISO 266).

[67] De quelques % du temps à 8 Hz, à 20 % du temps pour 20 Hz à une distance de 500 m de l'éolienne. Aucune fréquence en dessous de 8 Hz ne dépasse les différents seuils.

[68] Vitesse de vent standardisée.

6 Impacts sanitaires des infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes

6.1 Méthode de travail

- **Recherche bibliographique / identification des éléments bibliographiques d'intérêt**

Pour les besoins de cette revue des connaissances disponibles concernant les effets sanitaires liées aux infrasons et aux sons basse fréquence émis par les parcs éoliens, une recherche bibliographique[69] a été effectuée entre le 6 août 2014 et le 1er décembre 2015, la liste documentaire ayant été régulièrement mise à jour durant cette période.

En complément de cette recherche systématique par mots clés dans les moteurs de recherche, d'autres documents ont été identifiés *via* les références bibliographiques de rapports et documents clés préalablement identifiés.

Enfin, cette liste documentaire a également été complétée *via* les auditions au cours desquelles les différentes parties-prenantes invitées ont notamment porté à la connaissance du groupe de travail les références bibliographiques qu'elles ont jugées clés sur ce sujet.

Au terme de ces recherches, près de 600 documents ont été identifiés et classés suivant les critères suivants :

- la typologie du document (article scientifique, rapport, thèse, *proceeding*, poster, etc.) ;
- le sujet ou effets abordés (exposition, gêne, sommeil, stress, effets cognitifs, etc.) ;
- le type de bruit (toutes fréquences sonores, infrasons, basses fréquences, etc.) ;
- la nature de la source de bruit (éoliennes, transports, industrie, etc.).

- **Tri et analyse des documents identifiés**

Afin de permettre au groupe de travail de se concentrer sur l'analyse complète des documents les plus pertinents, un premier tri a été effectué afin de ne conserver que les documents sources (ceux relatifs à des études scientifiques produisant des données, par opposition aux revues de littérature) traitant d'effets sanitaires (élimination des documents traitant uniquement d'exposition sonore, d'effets sur l'environnement, de préoccupations énergétiques, etc.).

Les revues de littérature sont néanmoins succinctement analysées dans le chapitre 6.2 afin d'esquisser le panorama des différentes conclusions existantes.

Les documents restants ont ensuite été répartis suivant 5 grands types d'effets :

- effets auditifs ;
- santé générale (qualité de vie, paramètres physiologiques, équilibre, etc.) ;
- gêne – stress – sommeil – effets cardiovasculaires (hors VAD) ;
- effets cognitifs ;

[69] Moteurs de recherche : PubMed, Science Direct et Google Scholar

Mots clés : ([low frequency] AND/OR [infrasound]) AND ([wind turbine] AND/OR [windfarm] AND/OR [health])

- *vibroacoustic disease* (VAD).

Ces documents triés par type d'effet ont ensuite été individuellement analysés par le groupe de travail à l'aide d'une grille de lecture (voir Annexe 2) permettant de qualifier la qualité des données (existence ou non de biais dans l'étude) et la pertinence du sujet (par rapport au sujet des infrasons et basses fréquences émis par les éoliennes).

▶ Synthèse des connaissances relatives aux effets sanitaires potentiels des infrasons et basses fréquences émis par les éoliennes

Pour rappel, un premier paragraphe est consacré à une synthèse des principales revues de littérature existantes (chapitre 6.2). Ces documents sont différenciés suivant leur typologie (rapports institutionnels, revues soumises à comité de lecture et autres types de documents).

Sur la base des analyses individuelles d'articles produites, plusieurs synthèses de connaissances ont été réalisées sur des thématiques jugées pertinentes et devant être traitées séparément du fait de leurs particularités.

Ainsi, le premier paragraphe (6.3.1) est consacré aux quelques données épidémiologiques existantes concernant les effets du bruit des éoliennes sur la santé des riverains. Certainement du fait de la complexe séparation des effets par type de fréquence (comment imputer la causalité d'un effet à une bande de fréquence donnée lorsque les riverains observés sont soumis à l'ensemble du spectre d'émission, et non uniquement à la part de spectre étudiée ?), très peu de ces études se sont spécifiquement intéressées aux infrasons et basses fréquences. Par conséquent, cette synthèse intègre l'ensemble des études épidémiologiques étudiant la relation de causalité entre les émissions sonores des éoliennes, toutes fréquences confondues, et la santé des riverains. Les études relatives aux effets des basses fréquences et infrasons en milieu professionnel, jugées trop éloignées de la situation des riverains d'éoliennes en matière de temps d'exposition et de niveaux sonores, ont été écartées de cette analyse.

Le paragraphe suivant (6.3.2) est dédié à la synthèse des connaissances sur les mécanismes cochléaires et sur les effets des infrasons et basses fréquences sur la cochlée. Pour cette partie mécanistique, les articles retenus sont ceux jugés de qualité suffisante et se rapportant aux infrasons et/ou sons de basses fréquences indifféremment de la nature de la source émettrice.

La nature des sons étudiés (spectre audible, basses fréquences, infrasons, toutes fréquences, etc.) pouvant être contrôlée, ou pour le moins caractérisée, dans les études cliniques et expérimentales, la synthèse de ce type de données pour les infrasons a été séparée de celle pour les basses fréquences (respectivement paragraphes 6.3.4 et 6.3.5). Les articles traitant d'effets des infrasons (ou basses fréquences) spécifiquement issus d'éoliennes étant très peu nombreux, ceux-ci sont inclus dans ces synthèses même si leur qualité n'est pas entièrement satisfaisante. Les articles relatifs à des infrasons (ou basses fréquences) d'autres sources (climatisation, générateur sonore en laboratoire, etc.) ont également été intégrés à l'analyse lorsque leur qualité a été jugée suffisante et que les situations d'exposition ne sont pas trop éloignées de celles des éoliennes (par exemple, élimination des essais de tolérance au décollage d'une fusée pour lesquelles les expositions sont à de très forts niveaux et de courtes durées). Les études se rapportant aux effets des éoliennes toutes fréquences confondues sont exclues, car elles ne permettent pas de déterminer si les effets observés sont attribuables aux bruits audibles, aux basses fréquences ou aux infrasons.

Enfin, compte-tenu de l'importance de ces sujets dans les controverses actuelles, un paragraphe (6.4) traite spécifiquement des pathologies environnementales telles que la VAD et le syndrome éolien (*wind turbine syndrome*). L'ensemble des articles sources analysés sont inclus dans cette synthèse.

6.2 Travaux d'expertise et revues de littérature

L'examen des données abordant le sujet des effets sanitaires des infrasons permet de constater un fort déséquilibre entre sources bibliographiques primaires (documents relatifs à des expériences ou études scientifiques originales) et secondaires (revues de la littérature scientifique ou articles d'opinion) disponibles sur cette thématique. En effet, ces sources secondaires sont très abondantes face à un nombre restreint de sources primaires qu'elles sont censées synthétiser. Cette particularité bibliographique ajoutée à une divergence très marquée des conclusions de ces revues manifeste clairement l'existence d'une forte controverse sur cette thématique.

Le terme de source secondaire rassemble des revues systématiques de littérature mais également de multiples commentaires et opinions en réaction à certaines publications, signe supplémentaire de l'intensité des débats sur ce sujet. Compte-tenu du nombre élevé de ces sources bibliographiques secondaires et de l'intérêt limité à en réaliser une synthèse exhaustive, ce paragraphe s'attache à n'en décrire qu'une sélection (revues jugées pertinentes). Il est à rappeler que les très nombreux documents ne traitant pas des effets sanitaires mais d'autres thématiques liées au sujet des éoliennes (énergétie, politique, économie, etc.) ne sont pas retenus dans cette revue puisque considérés hors-sujet. Par souci de cohérence, les documents analysés sont successivement abordés et différenciés suivant leur typologie :

- les rapports publiés par des organismes publics (§ 6.2.1) ;
- les revues de littérature publiées dans des revues scientifiques à comité de lecture (§ 6.2.2) ;
- les autres revues (§ 6.2.3).

6.2.1 Organismes publics – rapports institutionnels

- **Canada : Santé Canada – Bruit des éoliennes et santé**

Santé Canada a réalisé, en collaboration avec Statistique Canada, en 2012, une étude épidémiologique dont les objectifs étaient :

- d'étudier la prévalence des effets sur la santé ou les indicateurs de la santé auprès d'un échantillon de canadiens exposés au bruit des éoliennes, à partir de mesures directes de l'état de santé et de mesures autodéclarées ;
- de se servir de la modélisation statistique afin d'établir le rapport entre l'exposition aux niveaux sonores produits par des éoliennes et des mesures directes de l'état de santé et autodéclarées ;
- d'étudier l'apport des infrasons et basses fréquences sonores produits par les éoliennes en tant que facteurs pouvant contribuer aux réactions défavorables de la collectivité.

Un résumé des résultats de cette étude a été mis à disposition en 2014 sur le site de Santé Canada[70] et l'équipe de recherche a publié ses travaux dans des revues scientifiques à comité de lecture. S'agissant de travaux d'épidémiologie et non d'une revue de littérature, les articles déjà publiés associés sont abordés au chapitre dédié aux travaux épidémiologiques (§ 6.3.1) et les résultats ne sont pas développés ici.

[70] http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/noise-bruit/turbine-eoliennes/summary-resume-fra.php

- **Canada : Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) - éoliennes et santé publique (synthèse et mise à jour des connaissances)**

L'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) a publié en 2013 une mise à jour d'une synthèse des connaissances relative aux liens entre éoliennes et santé publique datant de 2009[71]. Ces travaux ne correspondent pas, selon les auteurs eux-mêmes, à la définition stricte d'une revue systématique de la littérature scientifique (Bland, Meurer, et Maldonado 1995)[72]. Cependant, la démarche de mise à jour s'en rapproche (stratégies de recherche explicitées et sélection des documents intégrés en fonction de critères de qualité et de pertinence). Plus de 50 textes ont été retenus pour cette mise à jour qui aborde une large diversité de thématiques (bruit audible, infrasons, ombres mouvantes, sécurité des travailleurs, sécurité publique, champs électromagnétiques, etc.).

Les conclusions de ce document relatives au bruit audible des éoliennes sont les suivantes :

- le niveau de bruit engendré par les éoliennes n'entraîne pas d'impact direct sur la santé auditive (fatigue ou perte auditive) des personnes vivant à proximité ;
- deux effets sont retenus comme potentiellement associés aux niveaux de bruit engendrés par les éoliennes : la gêne et la perturbation du sommeil :
    - l'exposition au bruit des éoliennes peut représenter une nuisance pour les populations avoisinantes dans certaines conditions, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des maisons, mais des connaissances scientifiques restent à acquérir sur les niveaux et les facteurs qui l'influencent ainsi que les critères à appliquer pour l'évaluer et la réduire ;
    - l'effet de nuisance occasionnée par le bruit des éoliennes a été associé au niveau sonore, mais aussi à d'autres facteurs, notamment à la visibilité des éoliennes et à l'attitude des personnes exposées envers celles-ci ;
    - les niveaux de bruit engendrés par les éoliennes sont perçus comme plus dérangeants que ceux provenant d'autres sources de bruit. Cependant, la relation exposition-effet (dose-réponse) suggérée par des études actuelles reste à être améliorée ;
    - en raison du type d'études réalisées et de leur faible nombre, les preuves scientifiques concernant les impacts sur le sommeil sont limitées ;
- pour la gestion des risques sur la santé liés au bruit des éoliennes, certains pays possèdent des critères de niveau absolu et d'autres, des critères d'appréciation relatifs au niveau de bruit ;
- plusieurs études utilisent les modèles prévisionnels pour estimer l'exposition au bruit, mais des conditions doivent être respectées pour leur validité.

---

[71] https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1633_EoliennesSP_SynthConn_MAJ.pdf

[72] L'élaboration d'une revue systématique est basée sur un protocole détaillé préalable, établi selon le « *Cochrane Collaboration Handbook* » et est composée des cinq étapes suivantes :

1. définition claire de l'objectif *a priori*, avant toute considération des résultats et préparation minutieuse des questions ;
2. établissement d'une stratégie de recherche large dans plusieurs bases de données, en évitant l'introduction de biais ;
3. évaluation de la validité et de la pertinence des publications par attribution d'un indice de qualité et définition d'un seuil d'exclusion (attribution d'une cote pour chaque document, par deux examinateurs indépendants, en fonction d'une grille de lecture destinée à apprécier la qualité méthodologique et le niveau de preuve scientifique de ces documents ; élimination des articles qui n'arrivent pas à un certain seuil de qualité) ;
4. extraction des données sous forme d'annotations ;
5. synthèse des résultats des différents articles retenus et présentation sous forme de fiches simplifiées de présentation des évidences.

Concernant spécifiquement les infrasons et basses fréquences sonores, l'INSPQ aboutit aux conclusions suivantes :

- bien que les éoliennes émettent des infrasons et que de nouvelles études proposent des voies de transmission permettant à l'oreille de les détecter, il n'en demeure pas moins qu'aucune preuve ne supporte formellement l'hypothèse que des effets sur la santé sont occasionnés par les infrasons ;
- les sons basses fréquences peuvent être masqués par le bruit du vent lorsqu'il y a des turbulences ;
- l'intensité des sons basses fréquences produits par les éoliennes modernes est modérée et peut se situer autour du seuil de détection, selon la distance entre l'éolienne et le domicile des riverains ;
- rien ne permet de conclure à un effet quelconque des sons basses fréquences sur la santé physique lorsque leur intensité est inférieure au seuil de la perception humaine ;
- il n'est pas possible de conclure que les sons basses fréquences produits par les éoliennes constituent une nuisance pour les populations avoisinantes. Il est néanmoins important de considérer les plaintes et de les analyser.

▶ **Australie : National health and medical research council (NHMRC) - Systematic review of the human health effects of wind farms**

Le *National Health and Medical Research Council* (NHMRC) australien a publié en 2015 une revue systématique[73] dont l'objectif était de déterminer s'il existe des associations entre l'exposition aux parcs éoliens et des effets sanitaires chez l'être humain, et de déterminer, le cas échéant, si les associations identifiées sont de nature causale ou si elles peuvent être expliquées par le hasard ou par des facteurs de confusion.

Ce document aborde la thématique du bruit (incluant les IBF) mais également les champs électromagnétiques ainsi que les effets stroboscopiques et conclut qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'éléments de preuve suffisants en faveur de l'existence d'effets néfastes pour la santé humaine liés aux parcs éoliens. De possibles associations entre bruit éolien et des effets autodéclarés (gêne sonore, perturbation du sommeil et qualité de vie) sont néanmoins identifiées. Les auteurs soulignent les nombreux biais et facteurs de confusion pouvant expliquer ces associations ainsi que l'impossibilité de déterminer si ces effets (ou leur répartition) sont apparus après exposition au bruit éolien ou s'ils existaient avant l'implantation de ces structures (études transversales). Toujours d'après les auteurs, quelles que soient la réalité et la nature de ces associations, des effets de type gêne sonore et perturbation du sommeil sont improbables au-delà d'une distance d'éloignement de 1 500 m des aérogénérateurs. Il est à noter que ces effets ne sont pas considérés dans cette revue comme des effets sanitaires à part entière mais comme de possibles médiateurs vers des effets sur la santé (pathologie).

Concernant spécifiquement les IBF, le faible nombre d'études traitant des effets des infrasons mais également leur faible qualité scientifique sont soulignés (notamment : faible nombre d'individus étudiés pour pouvoir observer des différences ou similarités statistiques dans chaque étude, incohérence des effets observés entre publications).

[73] https://www.nhmrc.gov.au/guidelines-publications/eh57.

- **Royaume-Uni: Health Protection Agency (HPA) - Health effects of exposure to ultrasound and infrasound**

Dans une revue des connaissances relatives aux effets sanitaires liés aux infrasons et aux ultrasons, indépendemment de la nature de la source, la *Health protection agency* (HPA) du Royaume-Uni soulignait les points suivants en 2010[74] :

- chez l'animal, des études rapportent des effets biologiques pour des expositions dont le niveau sonore dépasse 100 dB, (atteintes du système auditif au dessus de 140 dB). La littérature scientifique traitant des niveaux sonores plus faibles est peu fournie et aucun effet biologique des infrasons n'a pu être établi ;
- chez l'être humain, le faible nombre d'études expérimentales de bonne qualité et leurs résultats divergents ne permettent pas d'établir l'existence d'effets biologiques ou comportementaux liés aux expositions aux infrasons (niveau de preuve insuffisant). Des atteintes et douleurs auditives pourraient intervenir pour des expositions intenses (au-dessus de 140 dB, niveau sonore dépendant de la fréquence du signal). Quelques éléments de preuve sont néanmoins disponibles sur de possibles effets des infrasons à plus bas niveaux sur l'état d'éveil. De manière générale, les études cliniques et épidémiologiques exploitables sont peu nombreuses.

Les auteurs concluent que le niveau de preuve disponible au moment de la réalisation de l'étude était insuffisant pour pouvoir apporter une réponse définitive quant à l'existence ou non d'effets sanitaires potentiels des infrasons liés à une exposition à des niveaux sonores couramment rencontrés dans l'environnement, cela notamment pour les expositions à long terme. Ils ajoutent que les données disponibles ne suggèrent pas que l'exposition aux infrasons en dessous du seuil d'audition puisse entraîner des effets sanitaires néfastes.

- **France : Académie de médecine - Le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'homme**

Dans un rapport daté de 2006[75], l'Académie de médecine considérait que le seul risque vraisemblable lié au fonctionnement des éoliennes et encouru par les populations riveraines était celui d'un traumatisme sonore chronique. Considérant que cet effet potentiel dépend directement de la distance à l'éolienne, les auteurs de ce rapport soulignaient la nécessaire acquisition de connaissance notamment *via* la réalisation d'une étude épidémiologique afin d'étudier la survenue de ces effets chez les riverains en fonction de la distance d'éloignement à l'éolienne la plus proche et des expositions sonores mesurées pour des temps longs. Dans l'attente de ces nouvelles données, l'Académie de médecine recommandait à titre conservatoire de suspendre la construction des éoliennes d'une puissance supérieure à 2,5 MW à moins de 1 500 mètres des habitations.

6.2.2 Revues de la littérature soumises à un comité de lecture

La plupart des revues de littérature soumises à un comité de lecture s'accordent sur la nécessaire considération des effets du bruit déjà documentés pour d'autres sources sonores (notamment la gêne) et sur leur complexité. Des divergences apparaissent quant à la plausibilité d'autres effets que ceux-ci, certains auteurs concluant en leur inexistence, d'autres signalant les lacunes de connaissances existantes. Quelques pistes de mécanismes d'actions sont suggérées. Des positionnements en faveur de l'existence avérée d'autres effets sanitaires spécifiques aux IBF ont pu être retrouvés, mais plus rarement.

---

[74] https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/335014/RCE-14_for_web_with_security.pdf.

[75] http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/eolienne_sante_2006_academie_medecine.pdf

Ainsi, dans une analyse des documents présentés au cours des congrès « *Wind turbine noise* » et de l'« *American acoustical society* » tenus en 2011, Palmer relève que si les études épidémiologiques ne montrent pas de lien clair entre bruit audible des éoliennes et effet sanitaire chez le riverain, des relations causales ont été documentées pour d'autres sources sonores en ce qui concerne certains effets sanitaires (modifications temporaires de paramètres physiologiques - pression sanguine, fréquence cardiaque et respiratoire -, gêne sonore et perturbation du sommeil). Ces connaissances sont, d'après l'auteur, suffisantes pour accréditer un lien de causalité entre bruit éolien audible et effets sanitaires équivalents à ceux déjà connus pour les autres sources sonores (Palmer 2011).

Dans une revue systématique très récente des études épidémiologiques présentée au congrès Euronoise 2015, Baliatsas *et al.* ont évalué l'association entre l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores et des effets sanitaires dans la population générale (Baliatsas, van Kamp, et van Pol 2015). D'après ces auteurs, les données suggèrent une association entre cette exposition et divers symptômes autodéclarés dont la gêne. Ils soulignent cependant la prudence requise pour interpréter ces résultats en raison du faible nombre d'études existantes sur lesquelles ils se fondent. Pour ce qui concerne l'association de ces expositions avec d'autres effets sanitaires, le niveau de preuve est actuellement insuffisant.

Schmidt et Klokker concluent également, en s'appuyant sur une revue systématique de la littérature s'intéressant aux associations entre exposition au bruit éolien et effets sanitaires, qu'il existe une relation dose-effet entre l'exposition au bruit éolien et le risque de gêne et de perturbation du sommeil autorapportée ; ils déterminent un niveau seuil de tolérabilité à approximativement 35 dBA (Schmidt et Klokker 2014). Les auteurs considèrent en revanche comme insuffisants les niveaux de preuve disponibles dans la littérature pour ce qui concerne les associations entre bruit éolien et autres effets sanitaires.

Mc Cunney *et al*. ont réalisé une revue de la littérature sur les effets du bruit éolien incluant des données épidémiologiques et des données expérimentales (McCunney *et al.* 2014), avec un focus sur les infrasons et basses fréquences sonores. Leurs conclusions sont les suivantes :

- les niveaux des infrasons émis par les éoliennes auxquels sont exposées les habitations riveraines se situent au dessous du seuil d'audibilité ;
- aucune étude cas-témoin n'a été identifiée au cours de cette revue de la littérature. Les études transversales les plus fiables ne montrent pas d'association claire et cohérente entre exposition au bruit des éoliennes et effets sur la santé ;
- il n'a pas pu être trouvé de risques sanitaires particuliers liés au bruit éolien, incluant les IBF, chez les riverains présents autour de ces installations ;
- la gêne associée à la présence des éoliennes est un phénomène complexe dans lequel interviennent des facteurs individuels. Le bruit éolien revêt une importance mineure dans le processus amenant les personnes à se déclarer gênées par rapport à d'autres nuisances liées aux éoliennes (visuelles, etc.).

Dans une revue ancienne mais très détaillée des expositions humaines aux infrasons et basses fréquences sonores et leurs conséquences sur la santé, Berglund signale les particularités de l'exposition aux IBF (Berglund, Hassmen, et Job 1996) : d'une part, les IBF sont ubiquitaires dans l'environnement quotidien du fait des nombreuses sources environnementales et anthropiques existantes et, d'autre part, les moyens de protection habituels de lutte contre le bruit s'avèrent être de faible efficacité à leur encontre. Malgré les difficultés méthodologiques pour mettre en évidence les effets liés aux IBF, les éléments de preuve disponibles suggèrent, d'après ces auteurs, que plusieurs effets nocifs liés au bruit (notamment la gêne) peuvent être attribués à l'exposition aux basses fréquences de ce bruit. Néanmoins, ces auteurs soulignent également que les basses fréquences sonores pourraient protéger des effets auditifs d'un bruit simultané à plus hautes fréquences.

Leventhall a réalisé en 2009 un état des connaissances relatives à la perception des infrasons et basses fréquences sonores ainsi qu'à leurs effets sur la santé. Il analyse les différentes hypothèses pouvant expliquer l'origine de déclarations de plaintes concernant les IBF (Leventhall 2009). Pour chacune de ces hypothèses, il identifie les lacunes de connaissances et énonce les questions-clés auxquelles il invite la communauté scientifique à répondre :

- le système auditif est-il le récepteur du corps humain le plus sensible aux basses fréquences dans le corps humain ? Existe-t-il un mécanisme de perception autre que celui-ci ?
- les infrasons d'intensité inférieure au seuil d'audibilité sont-ils dangereux ? Si oui, existe-t-il des seuils d'intensité permettant de se protéger de ce danger potentiel ?
- lorsque des plaintes sont liées à un bruit qui ne peut être objectivé par la mesure, ces plaintes seraient-elles liées aux fluctuations du niveau sonore de fond ?
- ces fluctuations peuvent-elles rendre gênant un bruit, de niveau d'intensité sonore moyen en dessous du seuil d'audition ?
- la combinaison des fluctuations du fond sonore avec une acuité auditive particulière pourrait-elle permettre à certaines personnes d'entendre des bruits de niveaux sonores si faibles (bien en dessous du seuil d'audibilité) alors qu'ils sont considérés comme inaudibles ?
- la façon dont sont mesurés les bruits basses fréquences masque-t-elle dans la pratique les caractéristiques pertinentes du bruit au regard de la gêne sonore ?
- compte-tenu de la distribution normale du seuil d'audibilité, pourquoi n'y a-t-il pas plus de plaintes liées aux IBF ?

À travers une analyse des principaux articles utilisés pour appuyer la preuve de l'existence d'effets sanitaires liés à l'exposition aux infrasons des éoliennes, le même auteur dénonce dans une publication plus récente la confusion constatée entre basses fréquences sonores (audibles) et infrasons dans ces documents (Leventhall 2013). Convaincu à la fois du faible niveau de preuve associé aux effets des infrasons des éoliennes et néanmoins de la réalité de la gêne sonore vécue par quelques personnes exposées à de faibles niveaux sonores, il considère comme très faible l'intérêt à porter à ce sujet des infrasons. Selon lui, la focalisation sur le sujet des infrasons serait même contre-productive, car elle détournerait l'attention du problème réel : une gêne sonore, complexe en soi, car faisant intervenir divers facteurs acoustiques et non acoustiques intriqués, liée au bruit audible, dont la gestion nécessiterait une approche pluridisciplinaire.

En contradiction complète avec les articles précédents, Phillips affirme l'indéniabilité des effets sanitaires imputables aux éoliennes du fait du nombre important de témoignages autorapportés. Il fustige notamment la méthodologie des revues de littérature existantes, notamment le peu de crédit accordé aux témoignages et autres données publiées non soumises à comité de lecture, accusant de partialité les rapports gouvernementaux et autres revues ne statuant pas en faveur de l'existence d'effets chez les riverains. Selon l'auteur, l'absence de revue d'un document par un comité de lecture ne peut pas justifier de l'écarter de l'analyse puisque, toujours selon l'auteur, ce système de relecture par des pairs, perçu par beaucoup comme un gage de qualité, ferait preuve de conservatisme scientifique et découragerait l'innovation plus qu'elle ne la favoriserait (Phillips 2011).

Concernant la gêne associée aux éoliennes, Baqtasch *et al*. soulignent dans un article abordant des éléments d'acoustique physique des éoliennes (métrologie, normalisation des mesures, propagation), de psychoacoustique et de réglementation, l'importance de l'attitude négative vis-à-vis de la source sur la gêne sonore et considèrent que les éoliennes émettent des infrasons dont les niveaux sonores ne devraient pas occasionner de problèmes (Baqtasch *et al.* 2006).

Doolan s'est penché sur les études relatives à la perception et à la gêne liés aux émissions basses fréquences des éoliennes et montre l'importance des facteurs visuels, économiques et psychologiques sur la modulation de la gêne sonore (Doolan 2013). Pour cet auteur, les infrasons

de faible niveau sonore ne sont pas directement perceptibles mais pourraient entrer en résonnance avec des portes ou fenêtres, et donc, être potentiellement perçus indirectement. Les basses fréquences (20 – 200 Hz) peuvent excéder le seuil d'audibilité et pourraient donc être corrélées à une gêne sonore.

La revue de littérature de Knopper *et al* incluant une soixantaine d'articles et traitant des effets du bruit, dont les infrasons et basses fréquences sonores, des champs électromagnétiques et des effets stroboscopiques, suggère une absence d'effets sanitaires des éoliennes pour les riverains mais de possibles nuisances sonores (dont la perturbation du sommeil) pour des niveaux sonores dépassant 40 dBA (Knopper *et al.* 2014). Les auteurs soulignent l'importance de la considération des variables subjectives associées à ces effets autodéclarés et affirment que les données disponibles suggèrent que les éoliennes ne sont pas à l'origine d'effets sanitaires lorsqu'elles sont correctement installées.

Dans une revue datant de 1978, Broner considère que les effets des basses fréquences s'apparentent à un degré moindre à ceux déjà connus pour le spectre audible (Broner 1978). Pour un même niveau de pression sonore, le bruit de fréquences comprises entre 20 et 100 Hz semble plus gênant que celui des infrasons, l'éventuel danger généralement associé aux infrasons ayant été certainement surestimé selon l'auteur. La gêne due au bruit semble être le premier effet des basses fréquences et infrasons, le seuil d'effet des infrasons se situant vers 120 dB. Broner souligne l'absence de données de bonne qualité, les lacunes méthodologiques de certaines études pouvant amener à des biais d'interprétation.

Quelques autres effets sont rapportés dans d'autres revues. Celle de Birnie *et al.,* en 1983, se basant sur les données expérimentales, relève de multiples effets sanitaires liés à des expositions très intenses aux infrasons (Birnie *et al.* 1983) :

- sensations d'« oreille pleine » à partir de 130 dB ;
- effets auditifs (déplacement du seuil d'audition) à partir de 137 dB (effet temporaire recouvré 30 minutes après la fin de l'exposition) ;
- modification du rythme respiratoire à partir de 130 dB ;
- absence d'effets sur les performances mais de possibles effets au-delà de temps d'exposition dépassant 40 min.

Chen *et al.* indiquent qu'il existe une possible sensation due aux infrasons, consciente ou non, *via* la cochlée (Chen et Narins 2012). Les données actuelles sont cependant insuffisantes pour déterminer si cette probable sensation induit des effets sanitaires. Néanmoins, considérant les relations existantes entre la modification d'activités du lobe temporal et la survenue de divers désordres psychiatriques, l'apparition de certains effets sanitaires psychosomatiques dus à des expositions aux infrasons constituerait une hypothèse à étudier.

Harrison s'est également intéressé à la plausibilité biologique du *Wind Turbine Syndrome* (WTS) *via* l'activation vestibulaire par les infrasons et basses fréquences sonores (Harrison 2014). L'auteur pointe les importantes lacunes de connaissances relatives à l'existence de ces effets biologiques dans les conditions d'exposition de riverains au bruit éolien, ces effets vestibulaires ayant été observés expérimentalement à de plus forts niveaux d'exposition sonore.

Pour Persinger, les infrasons, qu'ils soient issus de sources naturelles ou anthropiques, ont la capacité d'entrer en résonnance avec le corps humain car ils se rapprochent des vibrations naturelles de ce dernier (Persinger 2014). L'auteur rapporte des corrélations de niveaux modérés entre exposition prolongée à des infrasons de faibles niveaux (au dessus de 50 dB) et effets autorapportés (nausées, malaises, fatigue, douleurs non spécifiques, perturbation du sommeil, etc.). Il ajoute que ces constats convergent avec les connaissances récemment acquises en biophysique : les cellules intéragissent *via* l'échange d'infimes quanta d'énergie qui correspondraient (en énergie) aux pressions sonores de faibles niveaux produites par des phénomènes naturels et également par les éoliennes, ce qui pourrait amener à réduire la qualité de vie.

Enfin, Jauchem et Cook ont recensé et analysé les très nombreuses allégations d'applications militaires non léthales du son sous ses diverses formes : bruit audible, partie basses fréquences et infrasons (Jauchem et Cook 2007). Sur la base de nombreux avis d'experts sur ce sujet estimant pour la plupart que les effets des infrasons rapportés dans de précédentes études sont exagérés, d'arguments techniques (limitations techniques notamment liées aux dimensions de l'appareillage nécessaire à la production d'IBF de forte intensité, à leur faible directivité, etc.) et du constat de l'arrêt de programmes de recherche consacrés à leur développement, ils concluent qu'il est improbable que les infrasons et basses fréquences sonores de hautes intensités puissent produire un système convenable pour de telles applications militaires.

6.2.3 Autres catégories de revues

Bien que difficilement identifiables, puisque peu répertoriées dans les outils classiques de recherche bibliographique scientifique, de très nombreuses contributions de qualité hétérogène ont pu être trouvées et classées dans cette catégorie. Seules celles présentant des arguments scientifiques étayés sur les effets des infrasons et basses fréquences sonores figurent dans ce paragraphe. Les nombreux documents résumant les travaux liés à la « *vibroacoustic disease* » ne sont pas abordés ici, puisque ce sujet est détaillé au chapitre 6.4.1.

Comparativement aux catégories précédentes (rapports institutionnels et articles scientifiques soumis à comité de lecture), les conclusions sont souvent bien plus tranchées, aussi bien dans un sens que dans l'autre. L'analyse de cet ensemble documentaire semble ainsi dévoiler une situation plus controversée.

Dans une revue assez complète sur les connaissances des effets sanitaires liés au bruit des éoliennes (Colby *et al.* 2009), dont les infrasons et basses fréquences, réalisée par un comité d'experts pour le compte de l'*American wind energy association* et de l'association canadienne de l'énergie éolienne, Colby *et al*. ont identifié et analysé les diverses hypothèses de mécanismes d'effet sur la santé. Les experts de ce comité s'accordent sur les points suivants :

- « *Les sons et les vibrations produits par les éoliennes n'ont rien d'unique ;*
- *l'ensemble des connaissances actuelles sur le son et la santé est considérable ;*
- *l'ensemble des connaissances actuelles ne fournit aucune preuve que les sons audibles et les sons à basse fréquence en deçà des seuils audibles émanant des éoliennes ont des effets physiologiques nocifs directs de quelque nature que ce soit.* »

Ces mêmes auteurs jugent, sur la base de leur analyse bibliographique, que le « syndrome éolien » (WTS) « *repose sur une mauvaise interprétation des données physiologiques et que les caractéristiques du soi-disant syndrome sont de simples retombées de réactions qui relèvent de la gêne ou d'une indisposition* ». Ils considèrent de plus comme très douteuses les données sur lesquelles se fondent la VAD.

Concernant la pertinence de nouvelles études, les auteurs estiment que « *le nombre et la nature sans contrôle des cas rapportés existants d'effets nocifs sur la santé allégués comme étant associés aux éoliennes ne peuvent justifier le financement d'autres études sur ce sujet* ». Enfin, les conclusions principales de ce rapport sont les suivantes :

- *« le son émis par les éoliennes ne constitue pas un risque de perte auditive, ni d'ailleurs de tout autre effet nocif pour la santé des humains ;*
- *les sons à basse fréquence en deçà des seuils audibles et les infrasons produits par les éoliennes ne constituent pas un risque pour la santé humaine ;*
- *certaines personnes peuvent être irritées par les sons produits par les éoliennes. Cette indisposition n'est pas une maladie ;*
- *une des principales préoccupations liées au son provenant d'une éolienne est sa nature fluctuante. Certaines personnes peuvent trouver ce son gênant, ce qui serait une réaction*

qui repose principalement sur les caractéristiques spécifiques des personnes et non sur l'intensité des niveaux sonores. »

La revue de littérature effectuée par Parent concernant l'évaluation des risques imputables aux éoliennes sur les animaux (liés aux champs électromagnétiques, au bruit audible, aux infrasons, aux effets stroboscopiques et aux risques de collision) montre que, si les études disponibles sur le sujet ne semblent pas suggérer d'effets, ces connaissances demeurent lacunaires (Parent 2007).

Dans une revue de la littérature sur le sujet des effets sanitaires liés aux infrasons et basses fréquences sonores réalisée dans le cadre d'un rapport destiné à la Commission du service public du Wisconsin (États-Unis), Roberts *et al.* soulignent la difficulté d'évaluation liée à la non spécificité des effets de santé rapportés aux IBF et plus généralement aux éoliennes, aussi bien dans les témoignages recueillis que dans la littérature soumise à comité de lecture (Roberts et Roberts 2009). La gêne constitue un effet subjectif classique du bruit, et il apparait évident que des riverains sont gênés par le bruit généré par le fonctionnement des éoliennes. Néanmoins, les auteurs ajoutent qu'il n'y a pas d'éléments de preuve scientifique issus de données soumises à comité de lecture soutenant l'existence de pathologies ou conditions de santé altérées causées par les éoliennes.

Dans une revue générale sur le sujet des effets du bruit éolien sur la santé (Shepherd 2010), Shepherd souligne les connaissances accumulées relatives aux effets sanitaires du bruit audible issu de sources environnementales (gêne, perturbation du sommeil, diminution des performances scolaires chez l'enfant, effets cardiovasculaires). De plus, des travaux récents indiqueraient selon l'auteur une association entre la gêne liée au bruit éolien et la détresse psychologique, le stress, des difficultés à l'endormissement et des éveils. Il ajoute que l'altération de la qualité du sommeil n'entraîne pas uniquement fatigue, endormissement et diminution des capacités cognitives mais s'accompagnerait probablement de risques accrus d'obésité, de diabète, d'hypertension artérielle, de cancer et de diminution de l'immunité. S'appuyant sur ces éléments de connaissances, Shepherd conclut que le bruit éolien dispose du potentiel nécessaire à dégrader le bien-être physique, psychologique, social et environnemental des personnes qui y sont exposées. Concernant la gêne en particulier, il précise que les caractéristiques physiques descriptives du bruit sont faiblement prédictives de la gêne en raison de l'intrication complexe de différents facteurs individuels intervenant dans l'appréciation individuelle du bruit.

Dans un rapport de 2013 de l'Université de Salford préparé pour le gouvernement écossais, Von Hünerbein *et al.* ont produit une revue de littérature sur les 4 années précédentes focalisée sur le sujet de l'évaluation des effets sanitaires et de la gêne liés au bruit éolien (incluant les caractéristiques de modulation d'amplitude et les IBF) (Von-Hunerbein *et al.* 2013). Leurs conclusions sont les suivantes :

- des éléments de preuves tangibles sur la gêne due au bruit éolien sont disponibles ;
- des effets du bruit éolien sur la perturbation du sommeil, tels que ceux déjà connus pour le bruit en général, sont documentés mais restent controversés ;
- le bruit éolien, l'impact visuel, les bénéfices économiques et l'attitude vis à vis de la source ont été identifiés comme facteurs intervenant dans la gêne ; la contribution des IBF à la gêne impliquerait l'intervention d'un mécanisme d'action physiologique pour l'instant non reconnu ;
- concernant les stratégies d'atténuation, l'impact du bruit éolien devrait être réduit par l'application de valeurs limites de bruit conservatives. Les auteurs ont également identifié l'emploi de différentes distances d'éloignement mais mettent en garde contre l'existence d'inconvénients associés à ce mode de gestion : absence de considération des caractéristiques environnementales locales ou circonstances particulières, (niveau de fond sonore existant, topographie, etc.), non différenciation des différentes sources d'émissions sonores (les technologies de turbines éoliennes ne sont pas équivalentes). D'une manière générale, l'utilisation d'une distance d'éloignement, fixée en fonction de la source éolienne

la plus bruyante appliquée à toutes les éoliennes, serait non seulement rapidement obsolète et surtout préjudiciable à l'utilisation des éoliennes les moins bruyantes.

Dans un article publié dans un journal d'information des professionnels de l'acoustique, Chatillon recommande de ne plus considérer les basses et très basses fréquences comme imperceptibles par l'audition humaine par nature, les seuils de gêne étant même *a priori* plus rapidement atteint à ces gammes de fréquences (Chatillon 2011). Il signale les limites de la pondération A pour l'estimation des impacts sonores aux extrémités de la bande de fréquences audibles et avertit des effets sanitaires liés aux expositions à de fortes doses d'IBF, en matière de niveau sonore et de durée d'exposition.

Reposant sur divers travaux documentant de possibles associations entre exposition aux infrasons, ressentis négatifs assimilés au mal de mer et divers effets physiologiques, Renard conclut que l'exposition aux infrasons est susceptible d'entraîner des effets sanitaires tels que céphalées, vertiges, nausées, nystagmus (mouvements oculaires involontaires), trémulations (tremblements involontaires d'une partie ou de la totalité du corps), dyspnées (difficultés respiratoires) et troubles circulatoires (Renard 2005).

À travers l'analyse de 18 études, Arra *et al*. concluent à l'existence d'une association entre l'exposition au bruit des éoliennes et la détresse psychologique (*human distress*), en se basant sur le fait qu'aucune de ces études ne démontre l'absence d'association (Arra *et al.* 2014). Le groupe de travail réfute ce raisonnement car de manière fondamentale, si des travaux scientifiques peuvent réveler l'existence d'association entre une exposition et un effet, elles ne peuvent pas scientifiquement en démontrer l'absence.

6.3 Synthèse des connaissances relatives aux effets des infrasons et sons basses fréquences des éoliennes

Les conséquences sur la santé d'une exposition intense au bruit sont surtout connues et ont essentiellement été quantifiées dans le milieu du travail (effets auditifs). Toutefois, les niveaux d'exposition susceptibles d'engendrer des pertes auditives ne se rencontrent que très rarement dans le cadre d'expositions environnementales liées aux infrastructures de transport ou aux installations industrielles bruyantes.

Outre les effets du bruit sur les organes et la fonction auditive (fatigue et pertes d'audition), le bruit est susceptible d'entraîner des effets physiologiques extra-auditifs ainsi que des effets psychosociologiques et comportementaux.

6.3.1 Synthèse des données issues de l'épidémiologie

6.3.1.1 Effets du bruit audible sur la santé

Les effets physiologiques extra-auditifs du bruit sont actuellement encore insuffisamment reconnus et leur importance est de ce fait souvent sous-estimée. Le principal d'entre eux est la perturbation du sommeil. Le bruit perturbe le sommeil de différentes manières, à partir d'un niveau sonore faible. Il peut rendre difficile l'endormissement ou réveiller une personne et, par là, fragmenter le sommeil voire le raccourcir. Le bruit peut aussi empêcher d'atteindre un sommeil profond et altérer ainsi la qualité du sommeil. Un sommeil raccourci ou de moindre qualité a des répercussions sur la santé et les performances cognitives la journée suivante : la performance, l'apprentissage et l'attention sont réduits, les temps de réactions sont allongés.

Les autres effets physiologiques extra-auditifs du bruit peuvent soit résulter directement d'une exposition au bruit, soit être consécutifs aux perturbations du sommeil par le bruit. Ces effets comprennent notamment les réponses du système cardiovasculaire avec un risque accru d'hypertension et de troubles cardiaques ischémiques chez les adultes et une augmentation de la

tension artérielle chez les enfants. Par ailleurs, la sécrétion d'hormones ainsi que le système immunitaire pourraient être également perturbés.

La gêne constitue l'un des effets du bruit les plus étudiés. D'autres effets psychosociologiques et comportementaux du bruit ont été documentés dans la littérature scientifique : interférence avec la communication, effets sur les attitudes et le comportement social (agressivité et troubles du comportement, diminution de la sensibilité et de l'intérêt à l'égard d'autrui), effets sur les performances (dégradation des apprentissages scolaires notamment) ou encore sur l'automédication (prise de somnifères ou d'anxiolytiques).

Pour en savoir plus sur le sujet, se reporter au précédent rapport Anses relatif aux impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental (Anses 2013).

6.3.1.2 Effets du bruit des éoliennes sur la santé

Actuellement, il n'existe aucune étude épidémiologique qui se soit intéressée aux effets sur la santé des infrasons ou des sons basse fréquence émis dans l'environnement et plus particulièrement ceux produits par les éoliennes. Par conséquent, les paragraphes suivants concernent uniquement l'ensemble des études épidémiologiques étudiant la relation de causalité entre les émissions sonores des éoliennes, toutes fréquences confondues, et la santé des riverains.

Les niveaux d'exposition susceptibles d'engendrer des pertes auditives ne se rencontrent que très rarement dans le cadre d'expositions environnementales liées aux éoliennes. Cependant, les effets auditifs du bruit à proximité de ces installations demeurent non documentés par des études épidémiologiques.

Toutes les études épidémiologiques se sont intéressées à des effets sur la santé rapportés par les sujets eux-mêmes dans des auto-questionnaires : gêne, qualité de vie, qualité du sommeil, état de santé perçu, troubles anxio-dépressifs. Une seule a utilisé non seulement des mesures subjectives mais aussi des mesures objectives des états de santé : il s'agit de celle menée par Santé Canada.

6.3.1.2.1 Description des études épidémiologiques portant sur des populations exposées aux bruits audibles des éoliennes

Une dizaine d'études épidémiologiques transversales réalisées en population se sont intéressées aux effets du bruit audible des éoliennes sur la santé. Nous ne mentionnerons ni l'étude de Krogh et al. (Krogh, Gillis et al. 2011) menée au Canada, ni l'étude de Morris conduite en Australie (EPA-SouthAustralia 2013). En effet, le recrutement dans l'étude de Krogh et al n'a pas été systématique, les personnes ayant des problèmes de santé ont été encouragées à participer, ce qui a de façon certaine fortement biaisé les résultats de l'étude. L'étude de Morris n'a mesuré aucun facteur de confusion potentiel. Toute association mise en évidence dans cette étude pourrait donc être expliquée par de tels facteurs.

Parmi les dix études analysées, cinq ont estimé les niveaux de bruit audible des éoliennes à partir de modélisation pour caractériser l'exposition des participants, une a réalisé des mesures de bruit à l'intérieur et à l'extérieur des habitations mais seulement sur une courte durée (10 minutes) et les quatre autres ont utilisé la distance entre leur domicile et les éoliennes comme variable d'approximation.

- **Les études pour lesquelles le niveau sonore a été modélisé ou mesuré**

La première étude a été menée en 2000 dans un cadre rural et sur un terrain plat dans le sud de la Suède (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2004). 351 riverains dont le domicile était situé entre 150 et 1 200 mètres d'une éolienne ont été répartis dans six classes de niveaux de bruit audible dû aux éoliennes (<3 0, 30-32,5, 32,5-35,0, 35,0-37,5, 37,5-40,0 et > 40,0 dBA) en fonction du niveau de pression sonore (SPL) pondéré avec le filtre A calculé au niveau de la façade de leur domicile. Les informations ont été recueillies grâce à un questionnaire postal divisé

en quatre parties : la première concernait le logement, la satisfaction résidentielle, la sensibilité au bruit et la gêne en général ; la seconde partie portait spécifiquement sur les éoliennes, les aspects visuels et auditifs, la perception et la gêne ; la troisième partie s'intéressait aux aspects sanitaires (bien-être général, maladies chroniques et qualité du sommeil) ; et enfin, la dernière partie comprenait des questions sur l'activité professionnelle. Le taux de réponse a été de 68 %, variant de 60 % à 78 % selon la classe de bruit.

Une deuxième étude a été réalisée, toujours en Suède, en 2005, dans des zones avec des terrains variés et différents degrés d'urbanisation (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2007). 754 participants pour lesquels la distance domicile-éolienne était comprise entre 600 et 1 000 mètres ont été répartis dans cinq classes de niveaux de bruit audible dû aux éoliennes (< 32,5, 32,5-35,0, 35,0-37,5, 37,5-40,0 et > 40,0 dBA), en fonction du niveau de pression sonore (SPL) pondéré avec le filtre A calculé au niveau de la façade de leur domicile. Les informations ont été recueillies avec le même questionnaire postal que celui utilisé dans l'étude précédente (Pedersen and Persson Waye 2004). Le taux de réponse de 58 % variait de 52 % à 67 % selon la classe de bruit.

Une troisième étude similaire a été conduite aux Pays-Bas en 2007 (Pedersen 2011, Pedersen *et al.* 2009). 725 riverains dont le domicile était situé à moins de 2 500 mètres d'une éolienne ont été répartis dans cinq classes de niveaux de bruit dû aux éoliennes (< 30, 30,0-35,0, 35,0-40,0, 40,0-45,0 et > 45,0 dBA) en fonction du niveau de pression sonore (SPL) pondéré avec le filtre A calculé au niveau de la façade de leur domicile. Là encore, les informations ont été recueillies avec le même questionnaire postal que celui utilisé dans l'étude menée par Pedersen et Persson Waye en 2000 (Pedersen and Persson Waye 2004). Le taux de réponse était de 37 %, variant de 32 % à 44 % selon la classe de bruit.

Une quatrième étude a été menée en 2011 auprès de 62 riverains d'un parc éolien à l'ouest de l'état de New-York aux États-Unis (Magari *et al.* 2014). Cette étude est la seule à avoir réalisé des mesures de bruit à l'intérieur et à l'extérieur des habitations, mais ces mesures ont été effectuées sur une courte durée (10 minutes). Le questionnaire utilisé dans cette étude pour recueillir les informations a été adapté de celui développé par Pedersen et Persson Waye en 2000 (Pedersen and Persson Waye 2004).

Une étude conduite en 2011 a concerné 156 personnes âgées de 15 à 82 ans vivant à proximité de trois parcs éoliens du centre et du nord-ouest de la Pologne (Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.* 2014). Elle a utilisé le même questionnaire que les études menées en Suède en 2000 et 2005 (Pedersen et Persson Waye 2007, Pedersen et Persson Waye 2004). La distance domicile-éolienne était comprise entre 235 et 2 470 mètres et le niveau de pression sonore (SPL) pondéré avec le filtre A calculé au niveau de la façade de leur domicile variait de 37 à 48 dB. Le taux de réponse était de 71 %.

L'étude la plus récente a été réalisée en 2013 par Santé Canada en collaboration avec Statistique Canada auprès de 1 238 participants âgés de 18 à 79 ans (Feder *et al.* 2015). Ces riverains dont la distance domicile-éolienne était comprise entre 250 mètres et 11,2 kilomètres ont été répartis dans six classes de niveaux de bruit audible dû aux éoliennes (< 25, 25-30, 30-35, 35-40, 37,5-40,0 et 40-46 dBA) en fonction du niveau de pression sonore (SPL) pondéré avec le filtre A calculé au niveau de la façade de leur domicile. Le taux de réponse a été de 79 %. Il s'agit donc de la seule étude à avoir associé des mesures subjectives (réalisées à l'aide de questionnaires validés) et des mesures objectives des états de santé. La qualité du sommeil auto-rapportée a été évaluée avec l'indice de qualité du sommeil de Pittsburgh. Des mesures objectives de différents paramètres du sommeil (latence d'endormissement, efficacité du sommeil, temps de sommeil total, nombre et durée des éveils) ont été réalisées grâce à des actimètres. Le stress auto-rapporté a été évalué à partir d'une échelle de stress perçu ou *Perceived Stress Scale* (PSS) (Cohen, Kamarck, et Mermelstein 1983), questionnaire fréquemment utilisé pour mesurer la perception individuelle du stress. Le niveau de stress a également été déterminé à partir de la concentration de cortisol dans les cheveux des participants. Enfin, la qualité de vie a été évaluée à partir de la version abrégée du questionnaire de qualité de vie de l'OMS (*WHOQOL-BREF*).

- **Les études qui ont utilisé la distance entre les éoliennes et le domicile comme approximation de l'exposition**

Une étude menée aux États-Unis en 2010 (Nissenbaum *et al.* 2012) a comparé un groupe de 23 riverains dont la distance domicile-éolienne était comprise entre 375 et 1 400 m et un groupe de 15 riverains pour lesquels cette distance était comprise entre 3,3 et 6,6 km. Des questionnaires validés ont été utilisés pour recueillir les informations sur la qualité du sommeil (indice de qualité du sommeil de Pittsburgh), la somnolence diurne (score de somnolence d'Epworth) et la santé générale (deuxième version du *questionnaire SF-36*).

Une deuxième étude a été conduite en Nouvelle-Zélande en 2010 (Shepherd, McBride*, et al.* 2011). Elle a comparé un groupe de 39 riverains dont la distance domicile-éolienne était inférieure à 2 km et un groupe de 158 riverains pour lesquels elle était supérieure à 8 km. Les auteurs ont utilisé la version abrégée du questionnaire de qualité de vie de l'OMS (WHOQOL-BREF) qui contient des items permettant d'évaluer l'état de santé général mais également quelques items permettant d'évaluer un score dans le domaine psychologique. Le taux de participation était de 34 % pour le premier groupe et de 32 % pour le second.

Une troisième étude a été menée en 2012 en Pologne auprès de 1 277 adultes (Mroczek, Kurpas, et Karakiewicz 2012) répartis dans quatre classes de distances aux éoliennes (moins de 700 m, 700 - 1 000 m, 1 000 - 1 500 m, plus de 1 500 m). Les auteurs ont utilisé la version norvégienne du SF-36 *General Health Questionnaire* pour évaluer l'impact de la proximité des éoliennes sur la qualité de vie des riverains.

Une quatrième étude a été réalisée en Ontario en 2013 (Paller 2014). Elle a concerné 396 riverains dont la distance domicile-éolienne était comprise entre 300 m et 23 km (distance moyenne de 4 523 m ± 4,420 m). Des questionnaires validés ont été utilisés pour recueillir les informations sur la qualité du sommeil (indice de qualité du sommeil de Pittsburgh) et la santé générale (SF-12, version abrégée du SF-36). Les autres questions ont été adaptées de différents questionnaires provenant de plusieurs études : une étude sur la qualité de vie et les énergies renouvelables (Christidis *et al.* 2014), le projet *Windfarm* (F. van den Berg *et al.* 2008), une étude sur le bruit des avions (Schreckenberg *et al.* 2010) et une étude de *Statistics Canada* (Béland 2002).

- **Une méta-analyse**

Enfin, en 2015, Onakpoya *et al.* (Onakpoya *et al.* 2015) ont réalisé une méta-analyse de huit études pour un total de 2 433 participants (Bakker *et al.* 2012, Krogh 2011, Magari *et al.* 2014, Nissenbaum *et al.* 2012, Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.* 2014, Pedersen et Persson Waye 2007, Pedersen et Persson Waye 2004, Shepherd, Welch*, et al.* 2011).

6.3.1.2.2 Résultats des études épidémiologiques

- **Effets sur la qualité du sommeil**

Sept des dix études décrites précédemment se sont intéressées aux perturbations du sommeil que pourraient engendrer le bruit audible des éoliennes.

Études basées sur la perception de la qualité du sommeil

Dans l'étude menée en 2000 en Suède (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2004), 23 % des répondants ont déclaré qu'ils étaient perturbés par le bruit pendant leur sommeil. En revanche, aucune corrélation statistique n'a pu être trouvée entre la qualité du sommeil et la gêne due au bruit à l'intérieur ou à l'extérieur du domicile, l'attitude face à l'impact visuel des éoliennes, l'attitude face à leur impact en général ou encore la sensibilité au bruit. La deuxième étude réalisée en Suède en 2005 (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2007) ne montre pas d'association significative entre les niveaux de bruit des éoliennes et la qualité du sommeil rapportée.

Dans l'étude menée en 2007 aux Pays-Bas (Pedersen 2011, Pedersen *et al.* 2009), deux tiers des participants ne rapportent pas de perturbations du sommeil. Trente pour cent des répondants rapportent avoir des difficultés pour s'endormir au moins une fois par mois et 25 % disent être interrompus dans leur sommeil au moins une fois par mois. Paradoxalement, ce sont les riverains qui sont exposés aux niveaux sonores les plus bas qui déclarent le plus souvent avoir des difficultés pour s'endormir et ceux les plus exposés qui rapportent le moins de difficultés. Cependant, cette tendance disparaît après ajustement sur l'âge, le sexe et le bénéfice économique obtenu grâce aux éoliennes (G. P. Van den Berg *et al.* 2008). Quarante huit pourcent des répondants exposés à des niveaux sonores dus aux éoliennes supérieurs à 45 dBA disent être réveillés au moins une fois par mois (Pedersen 2011, Pedersen *et al.* 2009). Comparativement aux participants exposés à moins de 30 dBA, les riverains exposés à des niveaux supérieurs à 45 dBA déclarent trois fois plus souvent des perturbations du sommeil, après ajustement sur l'âge, le sexe et le bénéfice économique obtenu grâce aux éoliennes.

Dans l'étude menée en 2010 aux États-Unis, les participants habitant à moins de 1,4 km d'une éolienne déclarent avoir un sommeil de moins bonne qualité (temps d'endormissement plus long, temps total de sommeil raccourci) et une plus grande somnolence diurne par rapport à ceux habitant à plus de 1,4 km d'éoliennes (Nissenbaum *et al.* 2012)

Dans l'étude conduite en Nouvelle-Zélande en 2010, les individus résidant à moins de 2 km d'une éolienne déclarent une moindre qualité de sommeil par rapport à ceux habitant à plus de 8 km, celle-ci étant évaluée à partir d'une variable du questionnaire de qualité de vie de l'OMS, le WHOQOL-BREF (Shepherd et Billington 2011).

Dans l'étude réalisée en Ontario en 2013, une corrélation statistique significative a été montrée entre le logarithme de la distance et l'indice de Pittsburgh sur la qualité du sommeil, après prise en compte de l'âge, du sexe et du comté (Paller 2014) : la qualité du sommeil des participants s'améliore quand la distance augmente.

L'étude menée par Santé Canada (Michaud, Feder, Keith, Voicescu, Marro, Than, Guay, Denning, Murray*, et al.* 2016) ne montre pas d'association entre les perturbations du sommeil mesurées de façon objective et subjective et le niveau de bruit audible dû aux éoliennes.

La méta-analyse réalisée par Onakpoya en 2015 (Onakpoya *et al.* 2015) a mis en évidence une association entre l'exposition au bruit audible des éoliennes et les perturbations du sommeil avec un odds-ratio de 2,94 (IC à 95% = 1,98-4,37).

Part des perturbations du sommeil attribuées aux éoliennes selon les participants

Dans l'étude menée en 2000 en Suède (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2004), les participants ont cité plusieurs sources comme étant à l'origine des bruits perturbant leur sommeil (trafic routier et ferroviaire, voisinage et éoliennes). Dans les catégories de niveaux sonores des éoliennes les plus bas (< 35 dBA), la source éolienne n'était pas citée. Par contre, 16 % des 128 personnes interrogées dont le domicile était exposé à des niveaux sonores dépassant 35 dBA ont associé leur perturbation du sommeil aux éoliennes (parmi eux, tous sauf deux ont déclaré dormir fenêtre ouverte l'été).

Dans l'étude menée en 2007 aux Pays-Bas (Pedersen 2011, Pedersen *et al.* 2009), 15 % des personnes interrogées associent la perturbation du sommeil au bruit routier ou à d'autres bruits mécaniques, 13 % au bruit de voisinage et 5 % au bruit des éoliennes (6 % dans les zones calmes et 4 % dans les zones bruyantes).

Conclusion

Toutes les études épidémiologiques transversales qui ont recherché une association entre l'exposition au bruit des éoliennes et la qualité du sommeil (sauf une) ont montré une relation significative.

Cependant, le faible nombre d'études réalisées sur le sujet et des lacunes dans leur méthodologie (avec notamment la non prise en compte de facteurs de confusion majeurs, l'utilisation de questionnaires ni spécifiques ni validés et la non réalisation de mesures objectives) sont autant d'éléments incitant à considérer qu'il n'est actuellement pas possible de conclure quant à l'impact du bruit audible des éoliennes sur le sommeil.

- **Effets sur le stress, l'état de santé physique et la santé mentale**

Les deux études menées en Suède et l'étude réalisée aux Pays-Bas s'appuient sur des questionnaires similaires qui incluent des questions portant sur la présence de symptômes liés au stress : maux de tête, fatigue excessive, sentiment d'être tendu ou stressé et irritabilité. Mais aucune de ces trois études n'a mis en évidence de lien entre ces symptômes liés au stress et l'exposition au bruit audible des éoliennes (Pedersen 2011).

L'étude conduite aux Pays-Bas a utilisé la version en 12 items du *General Health Questionnaire* pour évaluer des troubles psychiatriques éventuels. Mais elle n'a pas montré d'association entre la détresse psychologique ou le score de stress et l'exposition au bruit audible des éoliennes quand d'autres facteurs tels que le bénéfice économique obtenu grâce aux éoliennes, l'âge et le sexe sont pris en compte (G. P. Van den Berg *et al.* 2008).

Nissenbaum et al. se sont servis de la deuxième version du *questionnaire SF-36* qui inclut une composante physique et une composante mentale (Nissenbaum *et al.* 2012). Ils n'ont pas mis en évidence d'association entre l'état de santé physique rapporté et la distance domicile-éolienne. Pour le reste, ils ont montré que le score de santé mentale des riverains vivant à proximité des éoliennes, comme celui des riverains dont le domicile est plus éloigné, peut être considéré comme normal, même si celui des riverains vivant plus près des éoliennes est plus mauvais. Par ailleurs, ils ont observé que les participants vivant à moins de 1,4 km d'une éolienne rapportent plus souvent un nouveau diagnostic de dépression ou d'anxiété après le démarrage des éoliennes (et de nouvelles prises de médicaments psychotropes, même si l'association est non significative pour cette variable) que ceux vivant à plus de 3 km d'une éolienne.

Shepherd et al. n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les deux groupes comparés en termes de distance domicile-éolienne, ni pour l'état de santé général ni pour le score psychologique mesurés à l'aide du questionnaire de qualité de vie de l'OMS (Shepherd, McBride*, et al.* 2011).

L'étude menée par Santé Canada ne montre pas d'association entre le niveau de bruit audible dû aux éoliennes et l'état de stress rapporté par les répondants (Michaud, Feder, Keith, Voicescu, Marro, Than, Guay, Denning, Bower, Villeneuve*, et al.* 2016) et mesuré par la détermination de la concentration de cortisol dans les cheveux. Il existe une bonne cohérence entre les déclarations des participants concernant leur état de stress d'une part et le niveau de cortisol mesuré d'autre part. Il n'existe pas d'association entre les niveaux de cortisol et le niveau de bruit audible dû aux éoliennes.

- **Effets sur la qualité de vie**

Shepherd et al. ont évalué la qualité de vie à partir de la version abrégée du questionnaire de qualité de vie de l'OMS (*WHOQOL-BREF*) (Shepherd, McBride*, et al.* 2011). Ils ont montré que, comparativement aux riverains dont la distance domicile-éolienne est supérieure à 8 km, ceux pour lesquels elle est inférieure à 2 km ont des scores significativement moins élevés dans les domaines physiques, environnementaux et la qualité de vie générale auto-rapportée. Ces scores n'ont cependant pas été ajustés sur le sexe et l'âge. Les auteurs ont également ajouté une question concernant l'aménité[76] dans le questionnaire : celle-ci s'avère significativement moins

[76] Une aménité environnementale est tout aspect de l'environnement appréciable et agréable pour l'homme, dans un lieu ou site particulier.

bonne pour les participants résidant plus près des éoliennes. Nissenbaum *et al.* ont demandé aux participants s'ils souhaitaient déménager et 74 % des riverains habitant à moins de 1,4 km d'une éolienne ont répondu par l'affirmative, alors qu'aucun participant résidant à plus de 3 km n'a répondu qu'il souhaitait déménager (Nissenbaum *et al.* 2012).

Mroczek et al. ont utilisé le *SF-36 General Health Questionnaire* pour évaluer l'impact de la proximité des éoliennes sur la qualité de vie de 1 277 adultes (Mroczek, Kurpas, et Karakiewicz 2012). La proximité des éoliennes ne dégrade pas la qualité de vie perçue par les riverains. Au contraire, les résultats semblent indiquer que les riverains situés dans la zone la plus proche des éoliennes (moins de 700 m) ont une meilleure satisfaction de leur qualité de vie que ceux situés à plus de 1 500 m.

Feder *et al.* ont également évalué la qualité de vie à partir de la version abrégée du questionnaire de qualité de vie de l'OMS (*WHOQOL-BREF*) (Feder *et al.* 2015). Mais contrairement à Shepherd *et al.* (Shepherd, McBride*, et al.* 2011), ils n'ont pas mis en évidence d'association entre les niveaux de bruit audible des éoliennes et les scores des domaines physique, psychologique, social et environnemental ou encore la qualité de vie générale auto-rapportée, ajustés sur l'âge et le sexe.

- **La gêne et ses déterminants**

Les deux études menées en Suède et l'étude réalisée aux Pays-Bas se sont intéressées à la gêne ressentie à l'intérieur et à l'extérieur des habitations. Dans ces trois études, la gêne est considérée comme une variable binaire « Pas gêné » *versus* « Gêné » où « Pas gêné » regroupe les modalités « Ne remarque pas », « Remarque mais n'est pas gêné » et « Légèrement gêné » alors que « Gêné » regroupe « Plutôt gêné » et « Très gêné ». Les trois études montrent que lorsque l'exposition au bruit audible des éoliennes est plus élevée, les riverains sont plus enclins à se déclarer gênés par le bruit des éoliennes. Concernant la gêne ressentie à l'extérieur, l'odds-ratio pour une augmentation de 1 dBA est de 1,24 (IC à 95 % = 1,13-1,36) dans l'étude suédoise de 2000, de 1,14 (IC à 95 % = 1,03-1,27) dans l'étude suédoise de 2005 et de 1,18 (IC à 95 % = 1,12-1,24) dans l'étude menée aux Pays-Bas en 2007 (Pedersen 2011). L'odds-ratio correspondant à la gêne à l'intérieur du domicile est de 1,38 (IC à 95 % = 1,20-1,57) dans l'étude suédoise de 2000, de 1,42 (IC à 95 % = 1,17-1,71) dans l'étude suédoise de 2005 et de 1,20 (IC à 95 % = 1,13-1,27) dans l'étude menée aux Pays-Bas en 2007 (Pedersen 2011). En plus de l'âge et du sexe, l'odds-ratio de l'étude aux Pays-Bas est également ajusté sur le bénéfice économique obtenu grâce aux éoliennes. Les riverains qui reçoivent ce bénéfice ont un risque moins élevé de se déclarer gênés malgré des niveaux de bruit dû aux éoliennes similaires (Pedersen *et al.* 2009).

Dans l'étude suédoise de 2000, Pedersen et al. ont montré que l'impact visuel des éoliennes sur les riverains était un très bon prédicteur de la gêne (l'introduction de l'impact visuel dans le modèle en plus de l'exposition au bruit audible des éoliennes augmente la part de la variance de la gêne prédite par le modèle de 13 à 46 % (Pedersen et Persson Waye 2004)). Par contre, ils n'ont pas trouvé d'effet de l'attitude envers les éoliennes ni de la sensibilité des participants au bruit.

L'étude suédoise de 2005 a observé des résultats similaires en ce qui concerne l'impact visuel des éoliennes : lorsque celui-ci est négatif, le risque d'être gêné est multiplié par 14 (Pedersen et Waye 2007). Mais contrairement à l'étude menée en 2000, ils montrent un effet significatif de l'attitude envers les éoliennes et de la sensibilité des participants au bruit.

L'étude suédoise de 2005 (Pedersen et Waye 2007) a également mis en évidence le fait que la gêne augmente avec l'exposition au bruit audible des éoliennes. Cette association est accrue - lorsque les participants habitent dans une zone rurale comparativement à ceux qui résident dans un milieu plus urbanisé,- lorsqu'ils déclarent que le niveau de bruit de fond est plutôt faible ou lorsqu'ils voient les éoliennes depuis leur domicile. Pour ceux qui résident en zone rurale, un terrain « complexe » (vallonné ou rocheux) augmente le risque par rapport à un terrain plat. L'étude conduite aux Pays-Bas en 2007 (Pedersen *et al.* 2009) a trouvé une légère association

entre la gêne et le niveau de bruit dû aux éoliennes lorsque le type de zone, la vue des éoliennes et le bénéfice économique obtenu grâce aux éoliennes sont pris en compte.

Le fait de voir ou non les éoliennes augmente le risque de gêne dans l'étude suédoise de 2005 (Pedersen et Waye 2007) comme dans celle conduite aux Pays-Bas en 2007 (Pedersen *et al.* 2009).

La gêne à l'extérieur du domicile et la gêne à l'intérieur sont associées aux perturbations du sommeil dans les deux études suédoises et l'étude néerlandaise (Pedersen 2011). La gêne à l'extérieur est associée aux maux de tête et à l'irritabilité dans deux des trois études et au diabète et au fait d'être irrité ou tendu dans l'une des trois études. La gêne à l'intérieur est associée au diabète, aux maux de tête, à la fatigue excessive, à l'irritabilité et au fait d'être irrité ou tendu dans l'une des trois études. Mais le design transversal de ces études ne permet pas de dire si ce sont les effets sur la santé (par exemple les perturbations du sommeil) qui ont précédé la gêne ou l'inverse.

En 2011, Janssen *et al.* ont réalisé une méta-analyse des trois études précédentes afin de déterminer une relation dose-réponse pour la gêne à l'intérieur et celle à l'extérieur du logement (Janssen *et al.* 2011). En comparaison aux autres sources de bruit environnemental (industriel et transports), les auteurs ont trouvé une gêne ressentie par rapport aux éoliennes pour des niveaux de bruit plus faibles. En outre, pour un même niveau de bruit, le pourcentage de personnes gênées est plus élevé et cette proportion augmente plus rapidement quand le niveau de bruit augmente. Par ailleurs, les auteurs ont aussi montré que la gêne est moins élevée chez les résidents qui reçoivent un bénéfice économique et plus élevée chez ceux qui voient les éoliennes depuis chez eux.

L'étude menée auprès des 62 riverains d'un parc éolien à l'Ouest de l'état de New-York aux États-Unis (Magari *et al.* 2014) n'a pas mis en évidence de relation dose-réponse entre le niveau de gêne individuelle et les mesures de bruit réalisées sur une courte durée.

L'étude conduite en Pologne avec 156 personnes âgées de 15 à 82 ans (Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.* 2014) a trouvé une relation dose-effet entre la gêne à l'extérieur et l'exposition au bruit audible des éoliennes avec un odds-ratio de 2,1 (IC à 95 % = 1,22-3,62).Ils ont également observé que l'attitude des sujets vis-à-vis des éoliennes en général ainsi que la sensibilité concernant la détérioration du paysage ont un impact sur la gêne ressentie.

La méta-analyse réalisée par Onakpoya et al. en 2015 (Onakpoya *et al.* 2015) a mis en évidence une association entre l'exposition au bruit audible des éoliennes et la gêne ressentie avec un odds-ratio de 4,08 (IC à 95 % = 2,37-7,04). Ils ont également trouvé que la visibilité des éoliennes depuis le logement des participants a un impact sur la gêne ressentie.

L'étude de Santé Canada (Michaud, Feder, Keith, Voicescu, Marro, Than, Guay, Denning, Bower, Lavigne*, et al.* 2016) montre une association entre le niveau de bruit audible des éoliennes et la gêne due à certaines caractéristiques des éoliennes (effet stroboscopique, lumières clignotantes, vibrations, effet visuel). Les variables associées avec la gêne due au bruit audible des éoliennes incluent notamment la gêne due à d'autres composantes des éoliennes, la perception d'un bénéfice économique personnel, la sensibilité au bruit, le sentiment d'insécurité, le statut de propriétaire et la province de résidence (Michaud, Keith*, et al.* 2016). La gêne est faiblement associée à d'autres effets sur la santé rapportés (vertiges, acouphènes, migraines et maux de tête) et au bien-être, indépendemment des niveaux de bruit audible.

En conclusion, les études ont montré que la gêne due au bruit des éoliennes est plus élevée quand les niveaux de bruit dû aux éoliennes sont importants. L'intensité de cette association diminue mais sa signification persiste après prise en compte de facteurs de confusion potentiels comme l'âge, le sexe, le bénéfice économique obtenu grâce aux éoliennes, la visibilité de celles-ci depuis le domicile et le type de la zone d'habitation. L'impact visuel des éoliennes est un meilleur prédicteur de la gêne que le niveau de bruit des éoliennes.

- **Autres effets**

Les deux études menées en Suède et l'étude réalisée aux Pays-Bas s'appuient sur des questionnaires similaires qui incluent des questions portant sur la présence de maladies chroniques, de diabète, d'une pression artérielle élevée, de maladies cardiovasculaires, d'acouphènes et d'une altération de l'audition. Seules deux associations significatives ont été mises en évidence (Pedersen 2011) : il s'agit de celle entre l'exposition au bruit audible des éoliennes et la présence d'acouphènes observée par l'étude menée en 2000 en Suède (OR = 1,25, IC à 95 % = 1,03-1,50) et de celle entre l'exposition au bruit audible des éoliennes et la présence de diabète montrée par l'étude conduite en 2005 en Suède (OR = 1,13, IC à 95 % = 1,00-1,27).

Dans l'étude menée en 2013 en Ontario (Paller 2014), parmi les huit composantes du syndrome éolien (WTS) étudiées (maux de tête, irritabilité, problèmes de concentration, nausées, vertiges, fatigue, acouphènes et perturbations du sommeil), seule la relation entre le logarithme de la distance et les vertiges est significative, après prise en compte de l'âge, du sexe et du comté de résidence. La relation avec les acouphènes est à la limite de la significativité (p = 0,08).

L'étude réalisée par Santé Canada (Michaud, Feder, Keith, Voicescu, Marro, Than, Guay, Denning, Bower, Villeneuve*, et al.* 2016) ne montre pas d'association entre le niveau de bruit audible dû aux éoliennes et les états de santé auto-déclarés par les répondants (vertiges, acouphènes, migraines et maux de tête fréquents, maladies chroniques comme les cardiopathies, l'hypertension et le diabète). Les mesures objectives de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque au repos sont cohérentes avec les déclarations des participants et elles ne sont pas plus associées avec le niveau de bruit audible dû aux éoliennes.

6.3.1.2.3 Lacunes méthodologiques des études épidémiologiques

La plupart des études épidémiologiques présentées ci-dessus présentent des lacunes méthodologiques qui rendent leurs résultats discutables.

Dans les études menées en Suède en 2000 (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2004) et en 2005 (Pedersen 2011, Pedersen et Persson Waye 2007), des facteurs de confusion majeurs comme la profession, le niveau d'éducation, le statut d'emploi, la présence ou non de maladies chroniques et leurs facteurs de risque, le degré d'urbanisation, le niveau de bruit ambiant et le type de terrain (plat, vallonné, etc.) n'ont pas été pris en compte dans les analyses.

Dans l'étude similaire conduite aux Pays-Bas en 2007 (Pedersen 2011, Pedersen *et al.* 2009), des facteurs de confusion majeurs comme la profession, la présence ou non de maladies chroniques et leurs facteurs de risque n'ont là encore pas été pris en compte. Par ailleurs, le taux de réponse à cette étude est faible, laissant craindre un biais de sélection des participants.

L'étude conduite en Pologne en 2011 n'a pas mesuré des facteurs de confusion socio-économiques majeurs. Il en est de même pour l'étude réalisée en 2012 en Pologne (Mroczek, Kurpas, et Karakiewicz 2012).

Les quatre autres études ont utilisé la distance entre leur domicile et une éolienne comme approximation de l'exposition, ce qui peut paraître discutable. Par ailleurs, dans l'étude menée aux États-Unis en 2010 (Nissenbaum *et al.* 2012), seuls l'âge, le sexe et le regroupement des ménages (« *household clustering* ») ont été pris en compte comme facteurs de confusion. D'autres facteurs de confusion essentiels comme la profession, le niveau d'éducation, le statut d'emploi, la présence ou non de maladies chroniques, le degré d'urbanisation, le niveau de bruit ambiant, le type de terrain et la visibilité des éoliennes n'ont pas été mesurés. Enfin, un biais de sélection est à redouter dans cette étude qui ne masquait pas son l'objectif aux participants, à savoir rechercher les effets potentiels sur la santé du bruit audible des éoliennes, ce qui a pu conduire les personnes pensant que de tels effets étaient avérés à davantage participer.

Dans l'étude conduite en Nouvelle-Zélande en 2010 (Shepherd, McBride*, et al.* 2011), des facteurs de confusion majeurs comme l'âge, la profession, le niveau d'éducation, le statut d'emploi, la présence ou non de maladies chroniques et leurs facteurs de risque, le niveau de bruit ambiant et la visibilité des éoliennes n'ont pas été pris en considération. Par ailleurs, le faible taux de participation laisse craindre là encore un biais de sélection des participants.

Dans l'étude réalisée en Ontario en 2013 (Paller 2014), des facteurs de confusion socioéconomiques n'ont pas été pris en compte et, surtout, le faible taux de participation laisse craindre un biais de sélection des participants.

6.3.1.3 Conclusion

Jusqu'à présent, peu d'études épidémiologiques se sont intéressées aux effets du bruit audible des éoliennes. Ce sont toutes des études transversales qui ne permettent pas d'affirmer que la cause, c'est-à-dire l'exposition au bruit des éoliennes, a bien précédé l'effet. Certaines de ces études ont estimé, à partir de modélisations, les niveaux de bruit audible des éoliennes pour caractériser l'exposition des participants. D'autres ont utilisé la distance entre le domicile des riverains et les éoliennes comme variable d'approximation de l'exposition au bruit. Et enfin, une seule a réalisé des mesures de bruit à l'intérieur et à l'extérieur des habitations, mais seulement sur une durée de 10 minutes. Si toutes ces études se sont intéressées à des effets sur la santé rapportés par les sujets eux-mêmes dans des auto-questionnaires (gêne, qualité de vie, qualité du sommeil, état de santé perçu, troubles anxio-dépressifs), aucune n'a réalisé de mesures objectives de ces effets. Seule l'étude menée par Santé Canada a réalisé à la fois des mesures objectives et subjectives de la qualité du sommeil et du stress.

Le faible nombre d'études réalisées sur cette question et les nombreuses lacunes dans la méthodologie de la plupart d'entre elles sont autant d'éléments incitant à considérer qu'il n'est actuellement pas possible de conclure quant à l'impact du bruit audible des éoliennes sur la santé. Par ailleurs, comme il n'existe aucune étude épidémiologique qui s'est intéressée aux effets sur la santé des infrasons ou des sons basse fréquence émis dans l'environnement et plus particulièrement produits par les éoliennes, cette question n'a pu être abordée ici.

6.3.2 Système cochléo-vestibulaire et infrasons ou sons basse fréquence

L'oreille interne est contenue dans un système complexe de tubes osseux creusés dans l'os temporal, ou rocher, qui forment le labyrinthe osseux, lui-même compartimenté par des membranes qui forment le labyrinthe membraneux. L'oreille interne comprend deux parties distinctes : postérieurement, le vestibule en charge de l'équilibre, et antérieurement, la cochlée en charge de l'audition. Bien que contribuant à deux sens distincts, la cochlée et le vestibule communiquent : notamment, les compartiments périlymphatique cochléaire et vestibulaire sont reliés par un canal perméable, les compartiments endolymphatique cochléaire et vestibulaire également (périlymphe et endolymphe étant les deux liquides de composition chimique différente remplissant les espaces membraneux de l'oreille interne). Les cellules sensorielles vestibulaires et cochléaires ont aussi de nombreux points de similitude, étant les unes comme les autres surmontées de microvillosités, les stéréocils. Ce sont les déflexions des stéréocils, sous l'effet soit des changements d'orientation ou de vitesse de la tête, soit du son, qui entrainent le passage de courants électriques à travers les cellules sensorielles. Ces courants déclenchent l'activation des neurones connectés à la base des cellules sensorielles, qui codent pour les sensations liées à l'équilibre ou à l'audition. Il s'ensuit qu'un certain nombre de pathologies et de troubles fonctionnels affectent à la fois le vestibule et la cochlée, et se traduisent à la fois par des troubles auditifs et de l'équilibre. Ce sont l'anatomie et les propriétés mécaniques des membranes et canaux constituant les différentes parties de l'oreille interne, la cochlée (cf. Figure 76) et le vestibule, qui déterminent leurs réponses aux stimuli.

Même en fonctionnement normal, des sons peuvent activer les cellules de l'équilibre et provoquer des réactions musculaires visant à modifier l'équilibre du corps, voire des sensations de vertige.

De même des accélérations de la tête peuvent perturber l'audition. Cependant ces réactions croisées (son/équilibre, ou accélération/audition), nécessitent des stimulations très intenses à moins qu'il n'existe des malformations du labyrinthe aboutissant à des communications de dimensions excessives entre ses compartiments.

La Figure 76 montre la complexité anatomique de la cochlée, et l'objet de ce chapitre n'est pas de la détailler mais d'en décrire les éléments pertinents pour comprendre si des stimuli peu audibles ou inaudibles, comme le sont les infrasons, peuvent avoir une influence sur les mécanismes cochléaires. Les éléments essentiels de cette figure, qui représente un schéma de la cochlée en coupe transversale, sont les deux compartiments liquidiens sus-mentionnés, remplis respectivement de périlymphe et d'endolymphe, appelés *rampes vestibulaire* et *tympanique* pour la périlymphe, *canal cochléaire* pour l'endolymphe, et leur séparation par la *membrane basilaire*. C'est la largeur de la membrane basilaire et son épaisseur qui déterminent sa fréquence de résonance, et c'est celle-ci, variable d'un endroit à l'autre, qui détermine l'amplitude de réponse de l'endroit considéré à un stimulus sonore de fréquence donnée : elle est d'autant plus ample que la fréquence de résonance et la fréquence du stimulus sont proches. Les cellules sensorielles (*ciliées externes* et *internes*) reposent sur des cellules de soutien elles-mêmes portées par la membrane basilaire. Les stéréocils des cellules sensorielles se trouvent pris en cisaillement entre la *lame réticulaire*, dont les mouvements suivent ceux de la membrane basilaire, et la *membrane tectoriale* qui sert de lest.

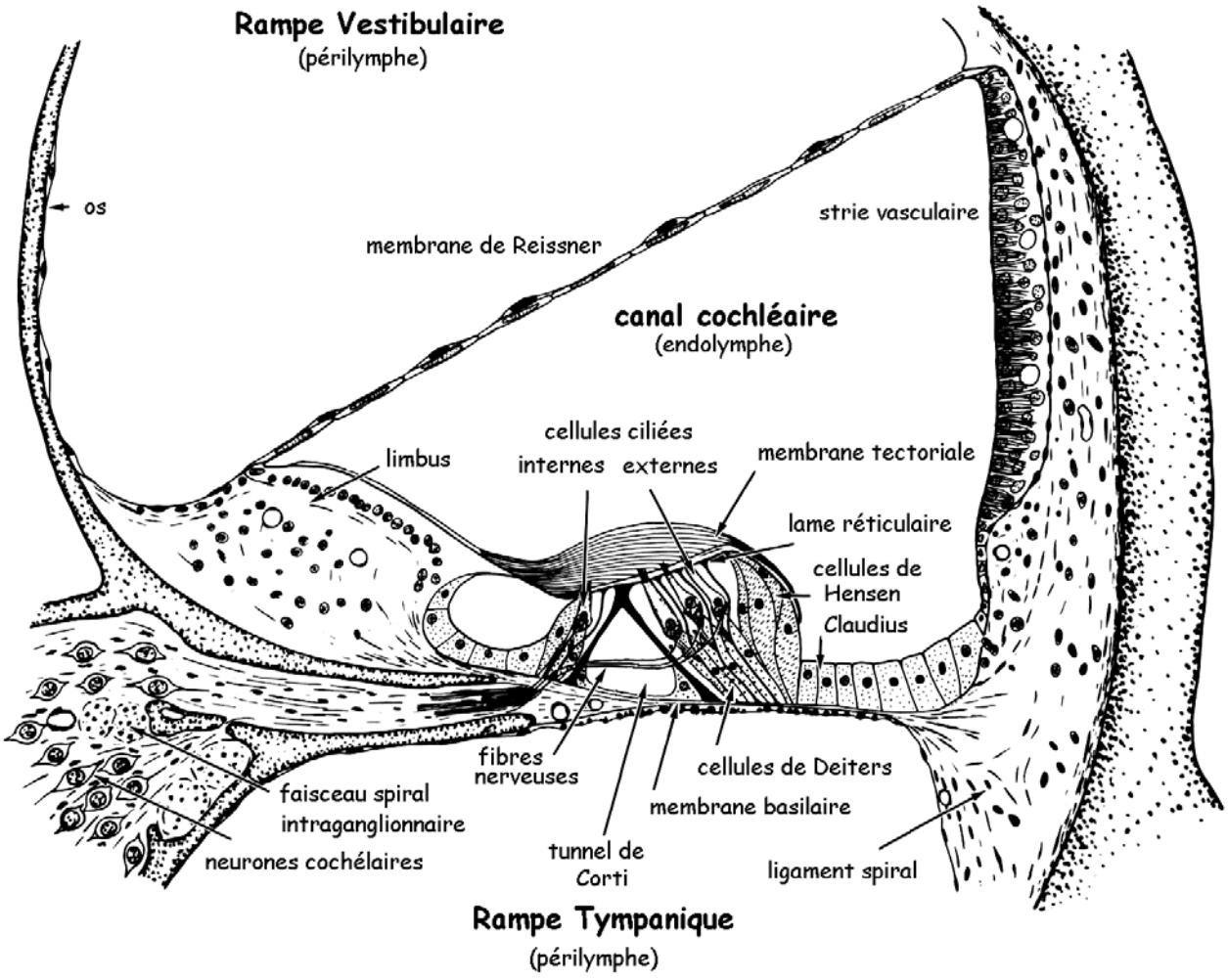


Figure 76 : structures sensorielles de la cochlée

Les cellules sensorielles de la cochlée humaine engendrent une sensation auditive en réponse aux sons dans la bande de fréquences 20 - 20 000 Hz. En dessous de 20 Hz, les courbes de Fletcher et Munson (Fletcher et Munson 1933) montrent que l'information sonore n'est pas audible si ce n'est à des intensités élevées. Les cellules sensorielles du vestibule détectent les modifications d'orientation de la gravité et les accélérations de la tête dans une bande de fréquences variant entre quelques fractions et quelques dizaines de hertz. Cependant, certains sons intenses de la gamme audible peuvent les faire répondre. Dans le continuum formé par les infrasons et sons de très basses fréquences qui sont à la frontière entre les domaines de sensibilité de ces deux organes (dont les espaces liquidiens communiquent), il n'est pas exclu que des ondes sonores donnent lieu à des sensations codées à la fois par la cochlée et par le vestibule.

La possibilité d'effets cochléo-vestibulaires de sons très basses fréquences non audibles est au centre de la partie qui suit. Historiquement, l'analyse des effets sur la santé possiblement liés aux infrasons des parcs éoliens a d'abord reposé sur le dogme qu'un infrason inaudible ne peut pas avoir d'effet. Devant les contradictions entre les rapports qui relèvent des niveaux d'infrasons inaudibles en bordure de parcs éoliens, et les plaintes des riverains, la question a alors été soulevée de savoir si un effet physiologique indésirable des infrasons pourrait être, soit médié par l'oreille sans pour autant impliquer le sens de l'audition, soit médié par une détection par d'autres parties du corps. Dans ces deux hypothèses, l'audibilité ou non des sons émis par les éoliennes ne serait plus un facteur pertinent. Du point de vue des effets possibles non corrélés à l'audibilité mais médiés par le système cochléo-vestibulaire, la littérature scientifique n'établit pas de distinction claire entre infrasons (inaudibles) et sons basses fréquences (audibles), donc nous n'établirons pas non plus de distinction dans ce qui suit, désignant l'ensemble des sons concernés par l'acronyme sons IBF (infrasons et basses fréquences).

6.3.2.1 La perception des sons très basses fréquences : auditive ou extra-auditive?

La plus grande sensibilité du système cochléo-vestibulaire aux sons très basses fréquences par rapport aux autres parties du corps est suggérée par une série d'expériences qui ont exposé des sujets normo-entendants et des sujets sourds à des infrasons et basses fréquences. Aucune perception n'a été ressentie dans les deux groupes à des niveaux inférieurs au seuil d'audibilité des sons très basse fréquence pour le groupe dont l'audition était normale (Yamada *et al.* 1983). Ce résultat indique que la détection auditive normale de ces sons très basse fréquence est plus sensible que la détection vibro-tactile par d'autres organes. Le seuil de détection auditive est estimé comme étant de 17 à 34 dB inférieur au seuil de détection par d'autres parties du corps. Un autre rapport (Nakamura et Inukai 1998) analyse quatre facteurs subjectifs : la sensation de pression sur le tympan, la vibration à travers le thorax, la perception auditive et une sensation générale de vibration. Il confirme la sensibilité privilégiée de la perception auditive. L'acoustique physique donne une base théorique à cette sensibilité privilégiée en indiquant que les sons transmis par voie aérienne sont en partie réfléchis par les tissus denses du corps, de sorte que leur pénétration s'accompagne d'une perte de 30 dB. Pour l'oreille, la membrane tympanique et les osselets de l'oreille moyenne, par un phénomène d'amplification du signal, compensent presque totalement cette perte, conférant ainsi à l'oreille un meilleur « coefficient de transmission ». Pour les autres organes, cette adaptation n'existe pas.

Dans ce qui suit, sans entrer dans les détails de la physiologie cochléo-vestibulaire (qui sont présentés en annexe), nous examinerons les questions suivantes :

A. Une fréquence sonore très basse fréquence assez intense est-elle audible chez l'homme ?
B. Une pression acoustique non audible car à très basses fréquences et de niveau infraliminaire, c'est-à-dire inférieur au seuil d'audibilité de chaque individu, peut-elle faire vibrer les membranes de la cochlée et stimuler les cellules sensorielles ?
C. Une pression acoustique non audible peut-elle avoir des effets physiologiques, notamment aux très basses fréquences, car ces sons pourraient faire vibrer toute la cochlée ?
D. Si un son IBF peut faire vibrer les membranes de la cochlée, mais pas suffisamment pour inciter les cellules sensorielles à donner une sensation auditive, peut-il cependant modifier les réponses de ces cellules sensorielles à d'autres sons audibles ?

E. Si les cellules sensorielles peuvent répondre à des IBF non audibles, la sensation produite est donc non auditive, quelle est alors sa nature ? Y a-t-il des neurones capables de véhiculer l'information correspondante et, le cas échéant, à quel endroit cette information est-elle décodée et interprétée ?
F. Si une pression acoustique non audible car de très basses fréquences parvient à faire vibrer les liquides de la base de la cochlée, la vibration peut-elle stimuler les récepteurs vestibulaires contigus ? Si oui, quel est le type de réponse ?
G. Peut-on identifier chez certains sujets des prédispositions à une sensibilité exagérée à des IBF normalement anodins ?

6.3.2.2 Système cochléaire

6.3.2.2.1 Les cellules sensorielles et leur stimulation

Il existe en fait deux catégories bien distinctes de cellules sensorielles dans la cochlée. Les unes, dites cellules ciliées externes (CCE), ont un rôle principalement mécanique qui est d'amplifier les vibrations sonores, grâce à une résonance interne. Les autres, dites cellules ciliées internes (CCI), ont un rôle principalement transducteur qui est de se dépolariser lors d'une stimulation sonore et de déclencher les réponses des neurones cochléaires. 95% des neurones cochléaires sont en effet connectés aux CCI et envoient aux centres cérébraux vers lesquels ils se dirigent des informations de nature auditive. Les 5 % de neurones cochléaires restants sont connectés aux CCE et leur fonction est mal connue, mais on sait qu'elle n'est pas auditive (Robertson 1984).

La position de repos des stéréocils des CCE est importante car elle conditionne la résonance des CCE, qui elle-même détermine la sensibilité de la cochlée et les réponses des CCI. À l'état normal, cette position de repos est fixée de manière à assurer un maximum de sensibilité. Un déplacement permanent de la position de repos est cependant possible si les membranes cochléaires sont déformées parce que le volume et la pression des liquides cochléo-vestibulaires sont mal régulés : on parle alors d'hydrops endocochléaire qui se traduit par les symptômes rencontrés dans la maladie de Menière, une maladie qui est définie par la survenue en crises de la combinaison de trois symtomes : pertes fluctuantes de sensibilité auditive avec sensation d'oreille bouchée ou « pleine », vertiges et acouphènes. Un déplacement temporaire de la position de repos peut être provoqué par des IBF (voir par exemple (Salt 2004)).

Deux facteurs déterminent la manière dont les sons sont codés dans la cochlée : outre la vibration de la membrane basilaire sur laquelle reposent les cellules sensorielles, abordée précédemment, la réponse de ces cellules sensorielles intervient aussi. Cette réponse est déterminée par la déflexion des stéréocils, microvillosités qui surmontent chaque cellule et qui sont mis en vibration lorsque la membrane basilaire vibre. La vibration des stéréocils entraîne en alternance l'ouverture et la fermeture de canaux ioniques à la cadence du son, et le passage d'un courant électrique qui déclenchera les réponses des neurones auditifs connectés aux cellules sensorielles. Ce courant est rendu possible par la composition chimique des liquides environnant les cellules sensorielles, périlymphe et endolymphe, qui produit une sorte de pile.

La vibration de la membrane basilaire (cf. Figure 77) est déclenchée par la mise en vibration de l'étrier, un des osselets de l'oreille moyenne par laquelle le son est transmis à la cochlée. Cette vibration répond au principe de tonotopie : un son se propage le long de la membrane basilaire et donne une amplitude de vibration maximum dans une région étroite de la membrane. La position du maximum de cette vibration est une fonction monotone de la fréquence, telle que sa distance à l'étrier augmente lorsque la fréquence diminue (cf. Figure 76). À cet endroit, l'amplitude de vibration est encore augmentée par la réponse des CCE. Si le son n'est pas transmis par voie aérienne, *via* l'oreille moyenne, mais par d'autres tissus, la stimulation se fait quand même le long de la membrane basilaire, mais avec une efficacité moindre (pénalisée de quelques dizaines de dB) car l'oreille moyenne joue le rôle d'un adaptateur qui compense la transmission défavorable entre l'air extérieur et l'intérieur du corps. Toutefois, certains sujets porteurs d'anomalies anatomiques de la boite crânienne facilitant la transmission des vibrations entre liquide cérébrospinal et labyrinthiques (déhiscence -c'est-à-dire, abrasion de la paroi osseuse- d'un canal

semicirculaire, dilatation de l'aqueduc vestibulaire par exemple) peuvent avoir une transmission anormalement efficace de vibrations transmises par voie tissulaire. Cet élément est pertinent pour répondre à la **question G** ci-dessus : certains sujets ont donc une réponse anormalement sensible à certains sons.

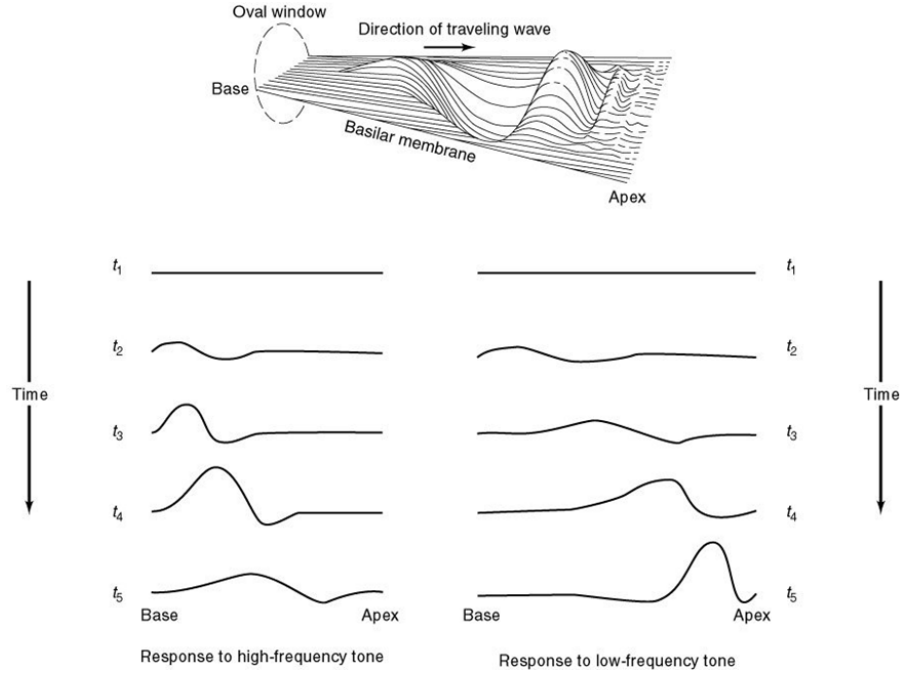


Figure 77 : onde propagée le long de la membrane basilaire cochléaire

Une stimulation à très basses fréquences donne un maximum de vibration dans la zone la plus apicale de la cochlée (Figure 77, diagrammes de droite), à proximité d'une structure anatomique appelée hélicotréma une ouverture qui met en communication la rampe vestibulaire et la rampe tympanique. Théoriquement, cette ouverture, si elle est d'assez grande taille, égalise les pressions dans les deux rampes et fait perdre à la stimulation sonore son efficacité stimulante. De fait, l'absence d'égalisation de pression lorsque l'hélicotréma est obturé artificiellement renforce l'effet stimulant des infrasons et basses fréquences (Salt et Hullar 2010). L'hypothèse a été émise que l'hélicotréma pouvait être obstrué naturellement chez certains sujets (Moller et Pedersen 2004) ce qui pourrait les rendre hypersensibles aux infrasons et basses fréquences, une réponse possible aux **questions A et G**. Au passage, elle met en mouvement, en phase, la quasi-totalité de la partition cochléaire.

La vision classique est que l'oreille moyenne ne laisserait pas passer les IBF, limitant ainsi leur audibilité aux fréquences supérieures à 20 Hz, et du reste, évitant au vestibule de répondre aux IBF. En fait, il a été proposé récemment (Ruggero et Temchin 2002) que la bande passante de l'oreille moyenne humaine excèderait celle dans laquelle la cochlée répond, comme elle le fait chez d'autres vertébrés où des mesures directes de cette bande passante ont pu être effectuées. Si tel est le cas, les IBF inaudibles, incapables de stimuler les neurones auditifs, pourraient néanmoins atteindre non seulement la cochlée, mais aussi le vestibule qui communique avec la base de la cochlée. Ceci répondrait alors positivement à la **question B**.

Le fait que le vestibule peut répondre à des vibrations sonores transmises à la base de la cochlée est validé depuis longtemps. Il sert en effet de base à un test de la fonction vestibulaire dit PEO ou potentiel évoqué otolithique déclenché par un son impulsionnel de l'ordre de 90 à 100 dB SPL. Bien que ce son ait un spectre en fréquences centré sur 2 à 4 kHz, il possède assez d'énergie en très basses fréquences pour exciter certaines cellules sensorielles du vestibule (voir plus haut). Une stimulation du vestibule par un son et non par une accélération de la tête peut entraîner un conflit sensoriel. Ce conflit survient de la manière suivante : les informations liées à une authentique accélération de la tête font l'objet d'un traitement non seulement par le vestibule, mais aussi par les systèmes visuel et proprioceptif, de manière concomitante. Une information originaire

du vestibule (mais en fait, de nature sonore) faisant penser à l'existence d'une accélération de la tête mais démentie par la vision et la proprioception, est incohérente. Empiriquement, elle entraine une symptomatologie du type « mal des transports » avec instabilité et nausées, sueurs froides, mouvements oculaires anormaux, fatigue, céphalées, etc. Ceci apporte un élément de réflexion à la **question F**, c'est-à-dire que le vestibule peut répondre à des sons et non à des accélérations de la tête. En l'absence d'une telle accélération, et donc de toute réponse visuelle ou proprioceptive, la réponse du vestibule est incohérente et déclenche un conflit qui, s'il se prolonge, peut aboutir à une symptomatologie de type « mal des transports ».

Codage particulier des sons de très basse fréquence (IBF) ?

Puisqu'il semble qu'un son IBF puisse faire entrer en vibration la cochlée apicale extrême, même lorsque ce son a une fréquence trop basse pour être audible, quelle serait alors la nature des réponses de la cochlée ? (cf. **question E**)

La structure apicale de la cochlée et l'organisation de ses cellules sensorielles, y compris leurs connexions avec le système nerveux auditif sont particulières, en ce que les CCE apicales possèdent un équipement synaptique qui ressemble à celui des CCI, avec une capacité au moins théorique à envoyer des informations riches vers les neurones cochléaires. Cette capacité soulignée par les neuroanatomistes et par les spécialistes de la microanatomie de la cochlée n'a pas été pour le moment testée sur le plan fonctionnel. Cependant, elle fait penser que les cellules sensorielles les plus apicales jouent d'autres rôles que ceux dévolus aux cellules sensorielles dans la région qui code entre 20 et 20 000 Hz. La question reste donc posée de savoir si les CCE apicales ne peuvent pas être réellement sensorielles comme des CCI, peut-être pour renforcer la perception des très basses fréquences (Dallos 1986)[77].

Pour tenter de répondre à la **question E,** on peut aussi s'interroger sur le rôle des 5 % de neurones cochléaires issus des CCE et non des CCI, cités plus haut. Il a été montré récemment que s'ils ne répondent pas aux sons ordinaires et ne contribuent donc pas à l'audition, ils sont activés par des stimuli susceptibles de léser les CCE ou de perturber leur homéostasie (Liu, Glowatzki, et Fuchs 2015). Il a été proposé que cette voie « non canonique » serve un but non pas auditif, mais de signalisation « douloureuse ». Le chemin suivi par l'information véhiculée par ces neurones et l'endroit dans le cerveau où l'information est interprétée ne sont pas encore bien connus. On pourrait imaginer qu'une stimulation anormale de nombreuses CCE, sans être audible, puisse activer cette voie non canonique et induire des sensations non auditives mais perceptibles et en tout cas, alarmantes. Mais aucune confirmation expérimentale de cette conjecture n'existe à la date de publication ce rapport.

6.3.2.2.2 Le codage des sons de fréquences moyennes et aiguës est modulable par un son très basses fréquences superposé.

Même si la cochlée la plus apicale se révèle incapable de donner des réponses neurales aux basses fréquences et infrasons, la **question D** soulève une piste alternative qui rendrait la présence de sons basses fréquences et infrasons détectable indirectement, de par la perturbation qu'ils induiraient sur la réponse à un son audible présenté simultanément.

Un son à très basses fréquences, qui fait vibrer toute la cochlée, peut perturber la perception des sons de fréquence moyenne ou haute en modulant lentement la position de repos des stéréocils des CCE. Cette modulation est appelée biais dans les articles qui l'étudient (Bian 2008, Bian et Watts 2008, Salt 2004). Nous avons vu plus haut que cette position de repos détermine la résonance des CCE, donc leur sensibilité aux sons audibles qu'elles codent. Puisque cette résonance est modulée à la cadence de biais des stéréocils, la sensation associée à un son audible présenté simultanément au son basses fréquences et infrason est modulée aussi. L'IBF peut ainsi devenir détectable, révélée par la présence des sons audibles concomitants.

[77] Voir également http://www.cochlea.org/

Cette propriété est utilisée désormais assez classiquement en expérimentation animale pour déterminer, *in vivo* et de manière non invasive, le comportement des stéréocils des CCE, par des biais appliqués au moyen de stimuli sonores de fréquences voisines de la centaine de hertz et de niveaux 100 dB SPL environ. Ce qui précède montre que le point soulevé par la **question D** est légitime mais il n'a pas été vérifié expérimentalement dans les conditions de fréquence et de niveau correspondant aux éoliennes. Il pourrait cependant l'être assez aisément en s'inspirant des expériences suivantes. Elles portent sur des sujets humains normaux et mesurent un signal sonore émis par la plupart des cochlées saines, les otoémissions dites spontanées (OES), qui témoignent du fonctionnement des CCE : on pense que par leur résonance, ces cellules peuvent donner lieu à des oscillations spontanées locales, dont la présence et les fréquences sont extrêmement stables dans une oreille donnée. Leurs fréquences s'échelonnent entre quelques centaines et quelques milliers de Hz. Une exposition à un son entre 25 et 100 Hz, à des niveaux variables mais de l'ordre de 106 dB SPL (ajustés empiriquement pour obtenir une modification détectable des OES) entraine des modifications de niveau et de fréquence des OES pendant l'exposition à la basse fréquence (Bian 2008, Bian et Watts 2008). D'autres auteurs (Kugler *et al.* 2014) ont exposé brièvement leurs sujets volontaires à un son très basse fréquence (30 Hz, 80 dBA c'est-à-dire 120 dB SPL, et ce pendant 90 s). Ce son était audible mais jugé non gênant. Les OES ont cependant été perturbées en fréquence et en amplitude (avec parfois l'apparition de nouvelles OES) par cette exposition, et ce qui est nouveau par rapport aux données précédentes, pendant une durée de l'ordre de 4 minutes supérieure à la durée d'exposition. La conclusion des auteurs est qu'un son très basse fréquence de niveau de sensation très modéré perturbe durablement des mécanismes qui influencent la fonction des CCE réparties tout au long de la cochlée.

Il ne serait pas difficile d'effectuer des mesures d'OES chez des riverains de parcs d'éoliennes et d'utiliser comme stimulus perturbateur le son des éoliennes elles-mêmes, mais cette expérience n'a pas été réalisée à la date de ce rapport.

Les perturbations induites par des sons basses fréquences et infrasons sur les CCE peuvent être la conséquence directe du biais exercé par ce son sur leurs stéréocils, mais pas seulement, car ces perturbations se prolongent plusieurs minutes au-delà de l'exposition. On doit donc émettre l'hypothèse que l'homéostasie cochléaire puisse avoir été perturbée de manière plus durable. Patuzzi et Salt (Patuzzi 2011, Salt 2004) ont suggéré que l'exposition aux IBF pourrait perturber durablement les équilibres ioniques des liquides cochléaires, notamment en ce qui concerne l'ion Ca^{2+}. La question de l'homéostasie cochléaire est développée dans la partie suivante.

6.3.2.2.3 Les effets perturbants des basses fréquences et infrasons sur l'homéostasie cochléaire

Un autre effet indirect de l'exposition à des basses fréquences et infrasons, peu dépendant de leur audibilité, est suggéré par la démonstration que cette exposition provoque un hydrops réversible. L'hydrops est défini par une augmentation de volume d'un compartiment cochléo-vestibulaire. On aborde ainsi la problématique de la **question C**, en examinant si une pression acoustique à très basse fréquence, en faisant osciller les stéréocils des CCE de toute la cochlée de part et d'autre de leur position normale d'équilibre, peut modifier la composition voire le volume des liquides cochléaires, modification pouvant perdurer un certain temps au-delà de l'exposition. Si le volume des liquides cochléaires est modifié, un hydrops est créé avec modification durable, cette fois statique, de la position d'équilibre des stéréocils des CCE (voir plus haut). Il a été montré chez l'animal de laboratoire qu'un hydrops transitoire peut être engendré par une exposition à un son basses fréquences ou infrason (Salt 2004). Les sons en question étaient de 200 Hz, présentés à 115 dB SPL pendant 3 minutes. L'augmentation de volume atteignait 33 %, et perdurait pendant quelques minutes. Le rôle des mouvements des ions et de l'eau dans l'apparition et la résorption de cet hydrops reste peu clair. Il est donc difficile d'extrapoler les données de Salt à des cas plus réalistes de personnes exposées à des sons de quelques hertz, plus longtemps (pendant plusieurs heures) mais à des niveaux plus faibles, cependant, le concept d'hydrops induit par un son basses fréquences ou infrason est à garder à l'esprit.

Or, il est actuellement admis qu'un hydrops cochléo-vestibulaire peut provoquer des symptômes, puisque la maladie de Menière est attribuée à l'existence d'un hydrops unilatéral. Cette maladie dont l'origine est inconnue et ne fait l'objet que de conjectures est définie par la survenue de crises symptomatiques durant lesquelles le patient éprouve une surdité neurosensorielle fluctuante, un vertige rotatoire et des bourdonnements, accompagnés de sensation de plénitude de l'oreille et de signes végétatifs associés au vertige (nausées, vomissements, sensation de fatigue, *etc*). La surdité est explicable par le déplacement de la position d'équilibre des stéréocils des CCE indiquée plus haut, les bourdonnements également, même si ces symptômes ne sont pas spécifiques de la maladie de Menière et existent dans d'autres contextes. Les vertiges sont expliqués par une stimulation indue des cellules du vestibule (organe de l'équilibre) également déplacées de leur état d'équilibre par l'hydrops.

De manière intéressante, certains symptômes de la maladie de Menière et du syndrome éolien (WTS) se ressemblent. Il existe des tests objectifs très simples de l'audition qui révèlent la présence d'un hydrops et servent au diagnostic de la maladie de Menière. Ils pourraient être appliqués aux plaignants du WTS pour tenter de déterminer si eux aussi ont un hydrops, mais à notre connaissance, à la date de rédaction de ce rapport, de tels tests n'ont pas été pratiqués. Il semble cependant que maladie de Menière et WTS diffèrent : les malades de Menière porteurs d'hydrops ont souvent des réactions d'intolérance, parfois suivies d'évitement, vis-à-vis de stimulations sonores extérieures (pas seulement à basse fréquence) mais aussi sismiques comme leurs propres changements de posture. Il ne semble pas que les personnes présentant un syndrome éolien (WTS) se plaignent nettement de difficultés à supporter les changements de posture.

Parmi les pistes susceptibles d'expliquer la survenue d'un hydrops endolymphatique accompagné de symptômes Menièriformes chez certains sujets et pas chez d'autres (ou chez certains sujets, seulement d'un côté), l'existence de facteurs de prédisposition a été étudiée, et certains de ces facteurs sont anatomiques (aisément vérifiables). Par exemple, Sando et Ikeda (Sando et Ikeda 1984) ont montré que les patients Menière tendent à avoir un aqueduc vestibulaire (un canal osseux qui relie le compartiment endolymphatique à la fosse crâniale postérieure) de dimensions plus petites que la normale, ce qui a été confirmé par Masutani *et al*. (Masutani *et al.* 1991). Yazawa et Kitahara ont montré que ces patients ont un os temporal d'anatomie anormale (Yazawa et Kitahara 1994). Les artères cervicales ont également des sténoses plus fréquentes chez les patients porteurs de troubles cochléo-vestibulaires de type Menièriforme (Gutmann *et al.* 1993). Ces pistes pourraient sans doute être explorées chez les plaignants du WTS en les comparant à des non-plaignants exposés identiquement (par exemple partageant le même domicile), ce qui permettrait peut-être de répondre à la **question G**.

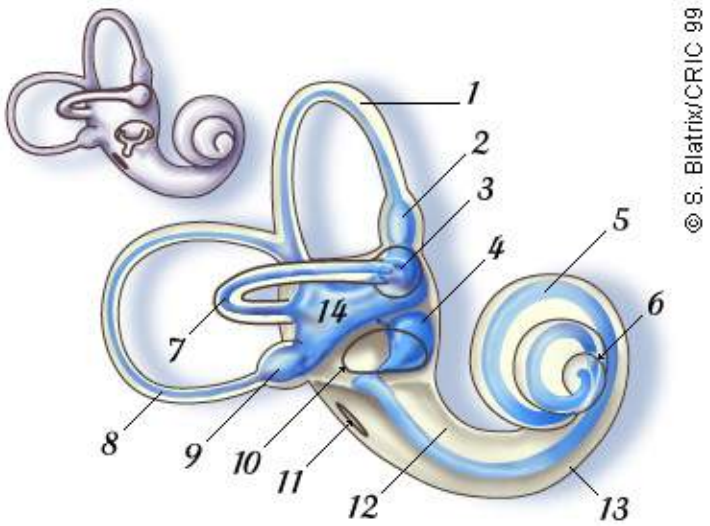
6.3.2.3 Le système vestibulaire et les sons très basse fréquence

La contiguïté entre la base de la cochlée et le vestibule soulève la **question F**. Puisqu'une stimulation intense haute fréquence est capable de déclencher, *via* le système vestibulaire, une réponse réflexe des muscles du cou ou oculomoteurs comme si le système vestibulaire avait détecté un changement de la direction de la pesanteur, qu'en est-il des IBF ? Plus la fréquence est basse, en dessous d'une limite de l'ordre de 20 Hz, plus sensible est le système vestibulaire si la vibration lui parvient. Quelles réponses vestibulaires pourrait-il déclencher ? À partir de quelles intensités ? Existe-t-il un seuil et ce seuil est-il le même chez tous les sujets ? Qu'en est-il des stimulations endogènes (respiration, pouls, mouvements, marche, *etc*) dont on sait qu'elles sont riches en composantes très basse fréquence, assez intenses ? Nous allons tenter de répondre à ces questions dans les paragraphes qui suivent.

6.3.2.4 Le vestibule, bref rappel anatomophysiologique

Le vestibule, organe de l'équilibre, partage avec la cochlée les deux compartiments liquidiens, dits péri- et endolymphatique. L'épithélium neurosensoriel vestibulaire est réparti au niveau de plusieurs zones aux rôles fonctionnels distincts : le saccule et l'utricule d'une part qui détectent la

verticale et les changements de position de la tête par rapport à celle-ci, et les trois canaux semi-circulaires d'autre part qui détectent les accélérations angulaires lors de rotations de la tête (Figure 78). Plus de détails sont donnés en annexe.



Légende : vestibule (4 : saccule ; 14 : utricule ; 1, 7, 8 : canaux semi-circulaires ; 2, 3, 9 : ampoules) et cochlée (10 : fenêtre ovale ; 11 fenêtre ronde ; 12 : rampe vestibulaire ; 13 : rampe tympanique ; 5 : scala media ; 6 : hélicotréma). Vestibule et cochlée comprennent deux compartiments liquidiens communicants qui renferment la périlymphe (espace clair) et l'endolymphe (espace bleuté).

Source : http://www.neuroreille.com/, site consulté en juillet 2016.

Figure 78 : anatomie de la cochlée et du vestibule

6.3.2.4.1 Sensibilité du vestibule aux fréquences acoustiques

Todd *et al*., en 2008 (Todd, Rosengren, et Colebatch 2008), ont examiné la question de la sensibilité des cellules du vestibule humain à une stimulation vibratoire basse fréquence (quelques dizaines ou centaines de hertz), partant de la constatation que des organes vestibulaires plus primitifs répondent non seulement aux accélérations et aux changements de direction de la gravité, mais aussi aux vibrations. Chez des volontaires humains, les auteurs ont appliqué une stimulation vibratoire au moyen d'un vibrateur au contact de la boite crânienne, de niveau et de fréquence variables dans une large gamme. Les réponses vestibulaires étaient détectées de manière objective au moyen d'une méthode électrophysiologique de routine en clinique appelée VEMP oculaire. Les auteurs ont montré que le vestibule répond préférentiellement à des vibrations autour de 100 Hz, avec une bande passante entre 25 et 200 Hz. La plus basse intensité donnant lieu à des réponses objectives, dont la présence démontre que les cellules vestibulaires ont détecté le stimulus, est de 15 dB inférieure à celle qui donne chez ces sujets une sensation auditive. Un stimulus de basse fréquence inaudible peut donc entraîner une réponse objective du vestibule.

6.3.2.4.2 Bénéfices des réponses vestibulaires aux fréquences acoustiques ?

La conservation au cours de l'évolution d'une sensibilité du vestibule aux sons, malgré sa spécialisation progressive pour la détection des accélérations, a quelques conséquences indirectes inattendues. Notamment, de nombreux amateurs de musique, au grand inconfort parfois de leur entourage, ressentent une addiction à la musique amplifiée riche en sons très basses fréquences (Todd 2001), qui les pousse à rechercher systématiquement une suramplification à la limite de la distorsion. Todd *et al.* soulignent que la capacité du vestibule à affecter la qualité des sons audibles pourrait aller de pair avec l'activation de circuits multisensoriels entretenant cette addiction (Todd, Rosengren, et Colebatch 2008). La voix pourrait aussi déclencher une auto-activation du système vestibulaire (Tait 1932). La transposition de ces considérations au cas des effets de la transmission de sons très basse fréquence d'origine éolienne pose plusieurs

questions : quelle est l'efficacité de la transmission vers le vestibule par voie aérienne, quelle est la bande passante (apparemment, le maximum d'efficacité est autour de 100 Hz, avec des réponses encore nettes entre 25 et 200 Hz), et pourquoi l'addiction ressentie pour la musique amplifiée à très basses fréquences se transposerait en une aversion dans le cas d'éoliennes ?

Un élément de réponse en matière d'aversion est un possible conflit d'informations, dans le sens où une oreille ou les deux détecteraient des stimulations vestibulaires interprétées comme des mouvements, mais les yeux ne détectent pas de mouvement. Ce conflit (incriminé dans le mal des transports) entraine des phénomènes végétatifs et des nausées. Le deuxième élément de réponse pourrait être l'hydrops, déjà évoqué pour la cochlée (Salt et Hullar 2010), entraînant par sa simple présence une stimulation anormale des cellules vestibulaires avec des conséquences analogues à celles rencontrées dans la maladie de Menière (vertiges, instabilités, nausées, fatigue, céphalées).

6.3.2.5 Conclusions

En résumé, le système cochléo-vestibulaire constitue un détecteur privilégié des sons basse fréquence et infrasons car ce système présente une grande sensibilité[78] à ces sons, ce qui le rend plus enclin que d'autres parties du corps humain à répondre à des niveaux d'exposition réalistes dans l'environnement.

D'autre part, les connaissances actuelles sur la physiologie du système cochléo-vestibulaire suggèrent plusieurs concepts conciliant l'existence d'effets physiologiques des sons avec le fait qu'ils soient de fréquences trop basses ou de trop faibles niveaux pour être clairement audibles, effets médiés par les récepteurs cochléo-vestibulaires (mais pas forcément par le cortex auditif). Parmi les mécanismes possibles :

- l'induction de réponses non auditives par les cellules vestibulaires lorsqu'un son très basse fréquence parvient à la base de la cochlée ;
- une stimulation « non canonique » des cellules sensorielles auditives les plus apicales activant des voies cochléaires non auditives ;
- l'induction de déséquilibres ioniques et volumiques dans les liquides de l'oreille interne par la mise en vibration globale et prolongée de la membrane basilaire par un son très basse fréquence ;
- l'induction de modulations de la réponse des cellules sensorielles auditives à des sons ordinaires par des sons très basse fréquence, inaudibles par eux-mêmes mais affectant l'audition des sons audibles concomitants. Certaines particularités, notamment anatomiques, pourraient prédisposer leurs porteurs à des modulations de plus grande intensité.

Ces phénomènes ne sont pas hypothétiques : ils ont été observés en laboratoire et sur des modèles animaux, ils peuvent être mis en évidence grâce à l'utilisation de sons très basse fréquence assez intenses. Ce qui est hypothétique est leur place éventuelle dans le *Wind Turbine Syndrome*, pour lequel les sons sont probablement d'intensité moindre qu'en laboratoire, mais de durée bien plus prolongée. Il pourrait être suggéré de rechercher spécifiquement les traductions audiologiques de ces phénomènes, assez faciles à mesurer par des appareils de tests cliniques, chez les personnes se plaignant du WTS (et pouvant même être leurs propres contrôles quand ils ne souffrent plus de WTS).

[78] La sensibilité du système dans sa gamme de fonctionnement est proche de la limite inférieure des meilleurs détecteurs physiques qu'il est possible de construire, puisque la plus petite pression acoustique détectable est proche du bruit thermique dû à l'agitation moléculaire.

6.3.2.6 Perspectives expérimentales chez les sujets exposés

Si les mécanismes cochléo-vestibulaires détectés chez l'animal de laboratoire lors d'expositions contrôlées à des IBF le sont également chez les riverains de parcs éoliens, pour pouvoir les incriminer dans le WTS, on doit notamment pouvoir détecter leur existence, évaluer leur intensité et notamment rechercher s'ils sont plus intenses chez les plaignants que les non plaignants de WTS.

Pour ce faire, il faudra extrapoler à l'Homme les techniques exploratoires audiologiques de laboratoire qui ont permis d'apporter la preuve du concept d'effets physiologiques pour des sons basses fréquences et infrasons peu ou pas audibles. Cette extrapolation est *a priori* aisée, car les explorations utiles sont non invasives et peuvent être effectuées en quelques dizaines de minutes. Parmi les tests à réaliser, ceux déjà validés pour la détection d'une homéostasie anormale des cellules sensorielles cochléaires dans le cas de malades de Menière semblent adéquats :

- otoémissions provoquées. Ces sons recueillis en quelques secondes au moyen d'un écouteur placé dans le conduit auditif externe traduisent le fonctionnement de la catégorie de cellules sensorielles auditives potentiellement sensibles à la présence d'excès de liquide labyrinthique (Salt-Hullar). Des tests ont été développés pour détecter de manière spécifique et sensible des instabilités des otoémissions en relation avec l'hydrops endolymphatique de la maladie de Menière (Avan *et al.* 2011, Gerenton *et al.* 2015) ;
- otoémissions spontanées. Ces otoémissions existent dans environ 30 % des oreilles d'adultes normoentendants. Elles y sont en général très stables en amplitude et en fréquence, constituant ainsi une sorte de signature biométrique. Il a été démontré récemment qu'une exposition de quelques minutes à des infrasons ou des sons très basse fréquence faisait brièvement dériver leur fréquence. Cette modification est une sorte de révélateur de l'influence des infrasons sur l'oreille interne du sujet testé ;
- électrocochléographie. Un signal est recueilli à partir d'électrodes collées sur le front et la mastoïde du sujet testé, en réponse à des sons brefs répétés de type clic (90-95 dB SPL). Il est constitué notamment de deux signaux, l'un appelé SP, qui mesure la dépolarisation des cellules sensorielles auditives, normalement très faible mais exagérée en cas d'hydrops, l'autre appelé AP, qui constitue une référence pour l'amplitude de SP en quantifiant la réponse du nerf auditif au son test. L'indicateur d'un hydrops cochléaire ou d'un défaut d'homéostasie des cellules sensorielles cochléaires est le rapport des amplitudes SP/AP, normalement inférieur à 0,40 ;
- vidéonystagmoscopie, qui permet la détection de mouvements oculaires anormaux en l'absence de stimulation réelle posturale, qui traduiraient une excitation indue du vestibule.

Ces tests peuvent tous être pratiqués sur le terrain et répétés sans inconfort. On pourrait donc concevoir de les réaliser chez des sujets, plaignants ou non, exposés ou non à des IBF en provenance du champ d'éoliennes auprès duquel ils résident. On pourrait ainsi déterminer si les effets des sons produits par les éoliennes sur le système cochléo-vestibulaire peuvent être incriminés dans la genèse de symptômes de WTS. Dans le cas contraire, les symptômes seraient à rechercher plutôt dans des effets extra-auditifs.

6.3.3 État des connaissances des effets sanitaires liés aux infrasons et basses fréquences sonores de fortes intensités

Contrairement à ce que l'on pourrait attendre compte tenu de l'importance des expositions à des infrasons et basses fréquences sonores intenses dans l'industrie moderne, peu de données générales sur les effets physiologiques des infrasons sont à ce jour disponibles. Bien que classiquement qualifiés d'inaudibles, les infrasons sont reconnus comme perceptibles à fort niveau et pouvant donner lieu à des effets nuisibles ou désagréables. La notion que perceptibilité ne signifie pas nécessairement audibilité, si la détection a lieu par l'intermédiaire de structures non auditives, est également bien admise. On constate cependant qu'il n'existe pas de réglementation sur l'exposition professionnelle à ces bruits et vibrations, mais seulement des recommandations.

L'exposition naturelle aux infrasons et basses fréquences sonores peut atteindre 135 dB SPL pour des phénomènes comme les tempêtes. L'exposition artificielle inclut celle due aux moyens de transport (120 dB SPL entre 1 et 20 Hz pour les passagers des trains, 115 à 150 dB SPL dans le même intervalle de fréquences pour les passagers d'hélicoptères), aux machines tournantes lourdes, aux armes à feu (bruits impulsionnels, mais aux spectres riches en IBF) et aux aérogénérateurs, objets de ce rapport mais qui évoluent dans une gamme de niveaux à peine différente de celle des sources naturelles (Chatillon 2006).

Les effets physiologiques décrits à faible niveau, autour du seuil audible, sont de type fatigue, stress, asthénie, céphalées, troubles de la vigilance ou de l'équilibre (Landstrom, Haggqvist, et Lofstedt 1988, Leventhall, Pelmear, et Benton 2003) et parfois attribués, sans preuve réelle, à la mise en vibration de certains organes. La difficulté à obtenir des preuves tangibles de ces phénomènes a été attribuée notamment au fait que la sensibilité semble très variable d'un sujet à un autre et, pour un sujet donné, d'un environnement acoustique à un autre, les bruits audibles semblant pouvoir atténuer les effets des infrasons et basses fréquences sonores.

Malgré ces difficultés, des recommandations ont été établies en ce qui concerne les expositions aux IBF par divers organismes nationaux : l'ACGIH aux États-Unis, la NZOSHS en Nouvelle-Zélande, le DEPA au Danemark, l'EKAS en Suisse, la norme ISO 7196:1995 (définssant la pondération G pour le mesurage des IBF), l'INRS en France et le CIOP en Pologne. Ces recommandations sont très difficiles à comparer ou exploiter, utilisant des pondérations différentes pour quantifier les niveaux acoustiques (SPL, A, G voire non indiquées) et oubliant parfois de préciser la durée d'exposition. Or une règle de l'acoustique physiologique est que le pouvoir lésionnel d'une exposition est la résultante d'un niveau d'exposition pendant un temps donné, selon la règle isoénergie qui considère que la toxicité d'une exposition acoustique dépend principalement de l'énergie reçue, le produit du niveau par le temps d'exposition. En termes d'évaluation de la gêne également, qui s'attache plus à quantifier l'émergence d'un son gênant qu'à son niveau d'énergie, la notion temporelle est essentielle (durée ou nombre d'occurrences). Donner l'un des paramètres sans l'autre n'a donc aucune valeur.

La comparaison, lorsqu'elle est possible, de différentes justifications sur lesquelles se basent les recommandations nationales fait ressortir quelques points de convergence. Par exemple que des expositions de plusieurs heures à des IBF de niveaux inférieurs à 120 dB SPL ne conduisent qu'à des troubles passagers. Entre 120 et 140 dB SPL (de très fortes intensités par rapport à celles mises en jeu par les aérogénérateurs), ces troubles sont appréciables mais jugés passagers et supportables par des personnes en bonne santé même si l'exposition se prolonge plusieurs heures. Le seuil de perception est estimé à 102 dBG entre 1 et 20 Hz, ce qui coïncide avec la limite recommandée par certains organismes, mais ne se justifie que par l'acceptation du « dogme » selon lequel un son non audible ne saurait avoir d'effet (voir § 6.3.2).

Ces recommandations portent sur la santé et le bien-être de personnes au travail.

6.3.4 Effets des infrasons - synthèse des données expérimentales et cliniques

Les études portant sur les effets des infrasons émis par les éoliennes sont difficiles à mettre en œuvre. Il est en effet impossible dans un champ d'éoliennes de les isoler du reste du spectre émis par les éoliennes pour en étudier spécifiquement les répercussions sur la santé des personnes exposées.

Il est par contre possible, à partir d'enregistrements de bruits d'éoliennes, d'examiner plus spécifiquement la partie correspondant aux infrasons et basses fréquences du spectre sonore. Ce type d'étude a été mené par exemple par Ambrose (Ambrose, Rand, et Krogh 2012) dans le but d'analyser les intensités et le pourcentage des IBF à l'intérieur des maisons par rapport à l'extérieur, dans différentes conditions d'expositions telles que la distance à l'éolienne ou la vitesse du vent. Si ces études peuvent éventuellement conduire à des corrélations avec le niveau de gêne (Møller et Pedersen 2011), elles ne démontrent en rien une relation causale entre les IBF, perçus en même temps que le reste du spectre émis, et les effets déclarés par les personnes exposées.

À partir des spectres enregistrés et de leurs caractéristiques, des investigations sur les niveaux d'intensités des IBF émis (Berger *et al.* 2015) ont été réalisées afin de comparer les niveaux de pression émis, non seulement avec le seuil d'audibilité de l'Homme, mais aussi les seuils de stimulations théoriques des cellules ciliées internes (CCI) et externes (CCE). Cette comparaison s'appuie sur les travaux de Salt. Ces études de comparaison révèlent dans certains cas, rares, des valeurs de fréquences (22,9 Hz, Ambrose 2012) pour lesquelles l'intensité sonore est supérieure au seuil d'excitation des OHC. Même dans ces cas, la transduction du potentiel d'excitation des OHC en perception auditive reste encore totalement à démontrer.

Ces modèles théoriques sont intéressants à explorer, mais ne permettent de conclure ni à la perception par le système auditif humain des infrasons émis par les éoliennes, ni à leurs effets sur la santé.

6.3.4.1 Éoliennes et infrasons

La première étude analysée ne concerne pas spécifiquement les effets des infrasons et basses fréquences sonores, mais ceux de l'exposition au bruit émis par des éoliennes, toutes fréquences confondues, sur le taux de cortisol (biomarqueur du stress) de deux groupes de 20 oies, le premier gardé à moins de 50 m des éoliennes (Gr. 1) et le second évoluant à 500 mètres de celles-ci (Gr. 2) (Mikolajczak *et al.* 2013).

Dès la 5ème semaine d'exposition, le taux de cortisol est significativement plus élevé dans le Gr. 1 (11,9 ng/mL) que dans le Gr. 2 (6,4 ng/mL). Dans ces deux groupes, les taux continuent à augmenter parallèlement à la durée d'exposition, pour atteindre 34,2 dans le Gr. 1 et 12,6 dans le Gr. 2 après 17 semaines. Les animaux nourris selon le même schéma dans les deux groupes sont pesés régulièrement. La perte de poids, liée à une moindre consommation de nourriture du Gr. 1, ne devient significativement différente (10 %) entre les deux groupes qu'en fin d'expérimentation. Les auteurs attribuent les différences entre ces groupes à la diminution des IBF émis par les éoliennes lorsque l'éloignement augmente.

En l'absence de mesure physique de l'exposition comme de son contenu spectral, cette conclusion ne peut pas être validée. De plus, une distance de 50 mètres à l'éolienne n'est pas extrapolable aux conditions d'exposition des riverains des parcs éoliens.

Ces travaux sont à mettre en lien avec l'étude épidémiologique de Santé Canada (Michaud, Feder, Keith, Voicescu, Marro, Than, Guay, Denning, Bower, Villeneuve*, et al.* 2016) qui indique une concordance entre les concentrations de cortisol dans les cheveux et le niveau de stress rapporté par les participants (cf. § 6.3.1.2). Cependant, cette étude n'a pas mis en évidence d'association entre l'exposition au bruit des éoliennes et ces mesures objectives et subjectives du stress.

La deuxième étude analysée porte sur deux cas : deux personnes d'une même équipe, chargées d'effectuer des mesures de bruit pendant 3 jours et 3 nuits consécutives, à l'intérieur et à l'extérieur d'une maison rapportent qu'ils ont ressenti des symptômes dès les premières minutes de présence sur le site (Ambrose, Rand, et Krogh 2012, Rand, Ambrose, et Krogh 2011). Ces symptômes sont ceux décrits par Pierpont dans le *Wind Turbine Syndrome* (nausée, irritabilité, diminution des capacités cognitives, anxiété, etc.). Constatant la simultanéité de ces effets et des rafales de vent, ils attribuent leurs symptômes aux infrasons générés par les éoliennes dans un environnement naturellement calme.

Les auteurs ont mesuré l'exposition en dBG. Les appareils utilisés et les conditions météorologiques sont bien décrits. À l'intérieur des maisons, ils enregistrent une atténuation de 10 à 20 dB pour les fréquences supérieures à 40 Hz et une amplification de 3 à 8 dB pour celles comprises entre 4 et 2 Hz. Ils notent aussi une modulation d'amplitude importante à une fréquence de 22,9 Hz. Ils comparent alors leurs mesures d'intensité avec les seuils de stimulation théorique, établis par Salt (cf. § 6.3.2), pour les cellules ciliées externes (CCE) et internes (CCI) de la cochlée ainsi qu'avec le seuil d'audibilité. Ils observent une stimulation possible des CCE, tout en restant sous le seuil d'audibilité. Ils en déduisent alors une corrélation entre les effets qu'ils ont observés sur eux-mêmes (similaires au WTS) et la sensibilité aux infrasons et basses fréquences sonores.

Ces articles, comme ceux de Salt, sont souvent cités comme preuve de l'existence d'effets liés aux infrasons générés par des éoliennes. Cependant, cette étude n'apporte aucun niveau de preuve de cette existence. En l'état actuel des connaissances, rien ne permet d'affirmer qu'une stimulation des CCE à ce niveau d'intensité puisse être corrélée à une stimulation auditive et une perception sensorielle nerveuse responsable d'une gêne quelconque.

Dans ces deux premiers articles, les auteurs ont cherché une corrélation entre l'émission des infrasons et des variations de marqueurs physiologiques (taux de cortisol, potentiel d'excitation des CCE). Si ces deux concepts sont intéressants, la méthodologie utilisée ne permet pas de conclure.

La troisième série d'études de Yokoyoma *et al.* (Sakamoto *et al.* 2014, Yokoyama, Sakamoto, et Tachibana 2013) consiste en des expériences de psychoacoustique pour lesquelles la recherche de seuils de perception de volume sonore ou de perception de modulation d'amplitude est réalisée par ajustement d'un paramètre physique aux sons tests. Ce mode expérimental évite le biaisage lié à des réponses de type binaire oui/non, augmentant l'une ou l'autre réponse en cas de doute. La fréquence de modulation comme la profondeur d'une modulation modifie la perception sonore, on parle de rugosité du son perçu. Plus la fluctuation est forte, plus le son est perçu comme désagréable.

Pour résumer, les auteurs ont enregistré, en extérieur et en intérieur, les bruits d'éoliennes situées à des distances comprises entre 48 et 908 m, avec des intensités de 37 à 56 dBA. Ils ont alors superposé à ces spectres des sons dans différentes conditions expérimentales. Ils ont étudié leur influence sur la perception sonore : le rôle de l'enrichissement en IBF en utilisant des filtres de fréquence de coupure haute fréquence variable ; la détermination du seuil d'audibilité en utilisant des filtres passe–bas et en réalisant des mesures par paliers ; l'effet de la modulation d'amplitude, d'une part entre 1 et 5 dB pour différentes fréquences du spectre émis par les éoliennes, d'autre part en surajoutant à ce spectre un son de fréquence variable, d'intensité constante de 27 dB mais avec une variation d'amplitude de 2,1 dB. Ils ont enfin refait ces tests, cette fois à partir d'un bruit d'éolienne synthétisé, avec une pente de 4 dB/octave comme celle trouvée dans les spectres d'éoliennes.

En 2015, les mêmes auteurs ont introduit des sons environnementaux (bruits routiers) ou industriels (ventilateurs) et effectué les mêmes tests pour des fréquences à partir de 4 Hz. Les spectres d'émission pour les 38 sources testées sont présentés. Enfin ils ont comparé les résultats d'égalisation de perception obtenus pour les différents filtres psychoacoustiques exprimant les intensités en dB A, C, Z et G. Les conditions d'enregistrements et d'expérimentations ne comportent pas de biais et sont correctement décrites. Les études ont été conduites sur 10 ou 25 sujets jeunes, ne présentant pas d'anomalies à l'audiogramme. Bien que le nombre de sujets testés soit faible, plusieurs des résultats obtenus par les auteurs sont intéressants.

Seuils d'audibilité : pour un L_{Aeq} entre 35 et 46 dBA, tous les sons de fréquence supérieure à 80 Hz sont classés audibles et tous ceux de fréquence inférieure à 20 Hz sont inaudibles. La détermination des seuils par paliers diminue le seuil d'audibilité à une valeur de fréquence de 60 Hz. Pour les spectres enregistrés en intérieur, le bruit d'enregistrement est inaudible pour des fréquences inférieures à 40 Hz.

Les résultats de l'égalisation sur toute la gamme des fréquences avec le son de comparaison donnent des droites de corrélation excellentes entre les décibels pondérés en filtre A et C. L'utilisation d'une pondération A permet de tester la sensation de modulation d'amplitude ou de volume même pour des sons dont les composantes en IBF sont enrichies.

L'effet d'un enrichissement en basses fréquences sonores par ajustement de la sensation avec un son stimulus montre que les sons de fréquence inférieure à 63 Hz contribuent pour beaucoup à la sensation de volume alors que ceux de fréquence inférieure à 16 Hz ne semblent pas intervenir. Dans leurs conditions expérimentales, la fluctuation d'amplitude est toujours ressentie pour des fréquences supérieures à 500 Hz et toujours inaudible pour des fréquences inférieures à 50 Hz.

Ces auteurs retrouvent donc la possibilité de réaliser des mesures d'infrasons avec un filtre A, à condition d'utiliser un facteur de corrélation. Dans aucun de leurs tests, les sujets ne perçoivent les sons de fréquence inférieure à 20 Hz.

Enfin, une étude australienne financée par l'EPA *South Australia* a cherché à établir un lien entre les journaux de gêne de riverains d'éoliennes et la nature de l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores (SouthAustralia-EPA 2013). Enregistrées sur deux sites (la distance aux éoliennes est de 3,5 km pour le premier site et 1,3 km pour le second) pendant deux mois, les mesures montrent en intérieur une composante fréquentielle correspondant aux IBF, avec des niveaux d'intensité inférieurs à 85 dBG. De plus, un grondement entendu après amplification des enregistrements est corrélé aux notes dans les journaux de gêne. Les auteurs en déduisent que dans des conditions particulières, passage des pales dans un environnement silencieux, sensibilité auditive personnelle accrue, temps d'exposition longs, les IBF émis par les éoliennes sont à l'origine de la gêne.

Cette conclusion ne prend pas en compte un biais de confusion important, à savoir un trafic routier important passant à 200 m des habitations. Par ailleurs, les auteurs attribuent le grondement au passage des pales, alors que ce bruit est également enregistré à des moments où les éoliennes sont arrêtées.

Cette étude dont la démarche est pertinente, n'apporte cependant pas de preuve concernant le lien entre la gêne ressentie par les riverains et les IBF émis par les éoliennes.

6.3.4.2 Infrasons émis par des sources autres que les éoliennes

Dans ce paragraphe, les articles étudiés se réfèrent plus spécifiquement à des infrasons et/ou des basses fréquences sonores, mais non émis par des éoliennes. Ces infrasons peuvent être expérimentalement produits à des fréquences et des intensités maitrisées, ce sont alors des sons purs (Fuchs, Verzini, et Nitardi 1995, Tamura *et al.* 2012). Ces infrasons peuvent être aussi émis par des bruits de ventilateurs (Persson Waye *et al.* 2004, K. Persson Waye *et al.* 2003, Kerstin Persson Waye *et al.* 2003, Persson Waye et Rylander 2001) ou des bruits blancs (He, Leickel, et Krahé 2015). Ces différents sons peuvent enfin être comparés à des enregistrements de bruits d'éoliennes, focalisés ou non sur les infrasons pour étudier les perturbations éventuelles du sommeil sur des électroencéphalogrammes (Inagaki, Li, et Nishi 2014).

Ces articles étudient des variations de marqueurs physiologiques du stress oxydatif, du cortisol, des pressions cardiaques ainsi que des études sur le sommeil. Ces mesures sont souvent associées à des questionnaires de gêne.

6.3.4.2.1 Marqueurs de stress oxydatif

Dans une étude expérimentale sur des souris (Tamura *et al.* 2012), les auteurs observent une perte du maintien de l'équilibre, une diminution significative des cellules ciliées de l'appareil cochléovestibulaire et une augmentation de trois marqueurs du stress oxydatifs (calbindin, phospholipides oxydés, D beta aspartate). Les animaux sont dans des cages à 10 ou 20 cm des hauts parleurs. Les souris sont réparties en 3 groupes de 7 animaux chacun, le groupe témoin (Gr. 1), les exposés (Gr. 2) en continu et pendant 1 mois (Gr. 3), respectivement à des sons basse fréquence de 100 Hz et haute fréquence à 16 kHz à 70 dB.

Bien que conduite sur un petit nombre d'animaux par groupe, cette étude permet de relier une atteinte comportementale (trouble de l'équilibre) à des lésions organiques (destruction des cellules ciliées) et des modifications biochimiques (stress oxydatif). Cependant, ces modifications observées sur des animaux soumis à une exposition chronique en continu pendant un mois, ne peuvent pas être extrapolées à une exposition à des éoliennes, dont l'émission est discontinue, l'intensité inférieure à 70 dB, et le spectre d'émission plus large. On peut aussi regretter l'absence d'étude histologique chez les souris exposées aux sons haute fréquence à 16 KHz, pour confirmer la spécificité de ces modifications par les basses fréquences sonores.

6.3.4.2.2 Études de variations de taux de cortisol

Dans deux études successives en 2003 et 2004, Persson Waye *et al.* ont voulu voir si une exposition aux infrasons et basses fréquences, avant de s'endormir et pendant le sommeil, modifiait les taux de cortisol salivaire au réveil puis au pic de sécrétion 1/2h après (Persson Waye *et al.* 2004, Kerstin Persson Waye *et al.* 2003). Les conditions d'expositions, quoique bien maîtrisées, sont complexes. Dans la 1ère étude : 1ère nuit d'acclimatation, 2ème et 4ème nuits non exposées, prises comme référence, 3ème et 5ème nuits avec une exposition soit à un bruit routier (L_{Aeq} 35 dB, L_{max} de 50 dBA), soit à un bruit de ventilateur (IBF de L_{Aeq} 40 dBA 31,5 – 125 Hz, modulation d'amplitude de 2 Hz de la bande d'octave de 50 Hz). Dans la seconde étude, après 3 ou 4 nuits d'acclimatation, les volontaires sont exposés cette fois pendant une seule nuit au bruit de ventilateur ou IBF. Les taux de cortisol au réveil ne montrent pas de différence entre les nuits sans exposition et les nuits d'exposition. Chez les sujets exposés aux IBF dans la 1ère étude, les auteurs notent que l'augmentation à 15 min reste en plateau, sans pic à 30 min. Ils ont aussi évalué la qualité du sommeil grâce à un questionnaire. Les résultats montrent une plus grande irritabilité après exposition aux bruits routiers, mais une plus grande fatigue après exposition aux IBF ; la 1ère nuit d'acclimatation étant malgré tout la plus perturbée. Les autres paramètres de l'humeur sont identiques entre les nuits de référence et les nuits d'exposition.

On ne peut rien déduire de cette étude, réalisée sur un petit nombre de patients, respectivement 12 et 26 volontaires en 2 groupes dans les 2 études. Les conditions d'endormissement dans une pièce d'expérimentation sont peut être à mettre en cause dans les résultats observés.

Dans une première étude expérimentale portant sur 38 femmes, Bengtsson *et al*. (Bengtsson, Waye, et Kjellberg 2004) se sont posé la question de savoir si l'exposition aux basses fréquences sonores pendant 3h40 modifiait d'une part la sécrétion de cortisol et d'autre part les performances cognitives évaluées grâce à des questionnaires et des tests de performance remplis avant, pendant ou après l'exposition. Trois échantillons salivaires ont été prélevés pour déterminer le taux de cortisol, le premier avant exposition et après 20 min de relaxation, le deuxième au milieu de l'exposition et le troisième, à la fin de l'exposition, a été associé à un questionnaire évaluant le stress. Les femmes ont été soumises pendant plus de trois heures à un bruit de ventilation de 45 dB en pondération A, soit sans préférence spectrale, soit au même bruit enrichi en BF, centré sur 31,5 Hz, avec un son pur additionnel de modulation de 2 Hz sur cette fréquence.

Les auteurs concluent à une même baisse significative du taux de cortisol pendant les deux types d'exposition, qui ne dépend pas de la fréquence. De même, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre les résultats des questionnaires de stress et les valeurs de cortisol déterminées à partir de prélèvement de salive. Les questionnaires remplis pendant les tests d'exposition, sans distinction de leur nature, révèlent une perte de concentration et un mal de tête par rapport aux questionnaires remplis avant les tests ou 3 heures après.

6.3.4.2.3 Études portant sur des paramètres physiologiques cardiaques (pression, fréquence) pouvant être corrélés à des questionnaires de gêne

Une étude expérimentale ancienne de la NASA (Alford *et al.* 1966, Edge et Mayes 1966) avait pour objectif de tester la tolérance humaine aux infrasons (sons purs de 22 Hz) dans le contexte de lancement d'aéronefs, pour des expositions à des niveaux élevés de 135 à 150 dB pendant 3 minutes. Pour les 21 sujets testés, aucun effet n'est observé sur l'électrocardiogramme, ni sur l'appareil vestibulaire (absence de nistagmus). Les effets observés chez certains d'entre eux sont un ressenti de pression dans les oreilles, une augmentation transitoire du seuil d'audibilité, un inconfort déclaré. Les auteurs ajoutent que les résultats à des tests de performance sont normaux.

Cette étude ne montre pas d'effet significatif pour des expositions élevées pendant un temps court.

En 1985, Danielsson *et al*. n'observent pas d'effets significatifs pour des niveaux sonores élevés de 95, 110 ou 125 dB(lin) pendant 20 min d'exposition à des tons purs de 6, 12, 16 Hz (Danielsson et Landstrom 1985). Les variations des pressions artérielles diastoliques sont minimes, passant de 65,9 à 66,2 mm Hg. Après 2 ou 3 cycles de 60 min d'exposition puis de 60 min de repos, précédés

la veille d'une exposition soit à 16 Hz de 125 dB(lin) soit à 50 Hz et 50 dB, les auteurs trouvent pour la fréquence de 16 Hz une augmentation de la pression diastolique de 8 mm Hg. Ils en déduisent une augmentation des résistances périphériques, puisque le rythme cardiaque n'est pas modifié.

Les conditions d'exposition ne sont pas toujours bien différenciées et la déduction mériterait des travaux complémentaires pour être validée.

Dans l'étude de Verzini et al en 1999, 22 sujets ont été exposés à un son pur de 10 Hz à 110 dB ou à un bruit de bouilloire filtré autour de 10 Hz à 105 dB, pendant 30 min, après et avant une période de silence de 15 minutes (Verzini *et al.* 1999). Les paramètres physiologiques comme les fréquences cardiaque et respiratoire, la température et la résistance de la peau ont été enregistrés en continu, toutes les minutes. Aucune modification de ces paramètres n'a été observée. La cabine de test a de plus été soumise à des vibrations comprises entre 10 et 80 Hz. Les sensations de vibrations ou résonance ne sont pas ressenties sur l'abdomen, la poitrine et la région lombaire, mais à la tête, les oreilles et la nuque. Avec l'exposition au bruit de bouilloire, une vibration dans les jambes est aussi perçue.

L'élévation des scores d'anxiété est directement corrélée à la gêne déclarée. Ces résultats montrent que des expositions élevées associées à des vibrations sont à l'origine de stress. Les auteurs n'ont pas mis en évidence de sensation de vibrations comme décrit dans la VAD.

Dans une étude expérimentale portant sur 16 sujets, Moller *et al.* (Moller 1984) ont comparé les effets d'un trafic routier (71 dB, Groupe 1) à ceux des expositions aux infrasons et basses fréquences sonores compris entre 6 et 31 Hz pour des intensités soit inférieures au seuil d'audibilité (Groupe 2), soit de 20 dB supérieures (Groupe 3). La durée des expositions est longue, de 3 heures.

Les paramètres physiologiques mesurés à l'aide de plusieurs examens diagnostics comme l'électrocardiogramme, le phonocardiogramme et l'audiogramme ne présentent aucune différence entre ces 3 groupes ou avec le groupe contrôle, non exposé. De même, un questionnaire de 12 items ne relève pas de mal de tête, mais une gêne due à l'exposition au trafic routier.

Une étude expérimentale de Fuchs *et al.* a mesuré la fréquence cardiaque et la température de 25 sujets, dont un groupe témoin (Fuchs, Verzini, et Nitardi 1995). Des sons purs de 10, 20, 40 et 80 Hz ont été produits dans des conditions expérimentales maitrisées. Dans une première étape, les seuils d'audibilité ont été mesurés à 94 dB pour 10 Hz, 80 dB pour 20 Hz et 62 dB pour 40 Hz. Les paramètres de santé ont été relevés après 20 minutes d'adaptation dans la chambre sans exposition, puis après 20 minutes d'exposition et enfin après 10 minutes de silence suivant l'exposition. Leurs valeurs pendant l'exposition ont été comparées à celles obtenues avant et après pour chaque sujet. Aucune différence significative n'est observée, quelle que soit la fréquence de stimulation pour les deux paramètres physiologiques.

À 10, 20 et 40 Hz, les sujets ressentent des sensations de pression dans la tête, les oreilles et la nuque. Les sensations de vibrations disparaissent à 40 Hz et aucune sensation n'est notée à 80 Hz. Bien qu'effectuée avec des sons purs, cette étude souligne qu'avec un temps d'exposition en continue de 20 minutes, un paramètre physiologique telle que la fréquence cardiaque reste stationnaire.

En parallèle, les auteurs ont remis un questionnaire aux sujets pour évaluer les sensations d'intensité sonore, de pressions et de vibrations ainsi qu'un ressenti agréable ou désagréable. L'exposition à 10 Hz est jugée la plus désagréable. L'exposition à 80 Hz est jugée aussi peu bruyante que l'absence d'exposition. Des sensations de pressions et de vibrations dans la tête et les oreilles sont ressenties avec la fréquence de 10 Hz. À 40 Hz, certaines personnes perçoivent en plus des vibrations dans les épaules. À 80 Hz, aucune personne ne perçoit de vibration.

Ces résultats sur les fréquences inférieures à 40 Hz méritent d'être confirmés.

6.3.4.2.4 Enregistrements de polysomnogrammes (électroencéphalogramme + électrooculogramme + électromyogramme)

- **Rappel physiologique**

Pour comprendre les résultats de ces études, un rappel succinct sur les différentes phases du sommeil et les tracés des ondes cérébrales qui leurs sont associés est présenté ci-dessous.

Les ondes cérébrales principales sont les ondes delta de 1 à 4 Hz (endormissement profond), les ondes théta de 4 à 8 Hz (sommeil léger), les ondes alpha 1 de 8 à 10 Hz (état de relaxation), les alpha 2 de 10 à 13 Hz (état de concentration), les ondes beta 1 de 13 à 20 Hz (conscience éveillée) et beta 2 de 20 à 35 Hz (état confusionnel).

- **Études portant sur les enregistrements de polysomnogrammes**

Okada *et al*. ont enregistré des polysomnogrammes (électroencéphalogramme + électrooculogramme + électromyogramme) chez 18 volontaires soumis à des expositions, répétées sur 3 nuits, d'intensités aléatoires de 40, 50 ou 60 dB, pendant 30 s pour 20 min d'enregistrement, soit pour des bruits de trafic routier reproduits soit pour des sons basses fréquences purs (10, 20, 40, et 63 Hz) (Okada et Inaba 1990). La sensibilité au bruit est déterminée par le pourcentage, en nombre et en durée, de modifications de rythme à l'EEG pendant les différentes phases de sommeil. Pour les sons testés de 40 et 63 Hz, le seuil de pression acoustique diminue avec l'augmentation de la fréquence testée ou celle de l'intensité, 95 dB à 40 Hz et 90 dB à 63 Hz. Les seuils à 10 et 20 Hz n'ont pas pu être évalués, mais le nombre de modifications des rythmes de l'EEG à 20 Hz devient significatif, uniquement pendant la phase d'endormissement, pour une intensité de 105 dB. Le profil de sommeil est faiblement impacté par ces sons et aucune différence significative de qualité de sommeil n'est observée entre les nuits d'exposition aux IBF et les nuits sans exposition.

L'exposition aux bruits du trafic routier à 60 dB engendre des difficultés d'endormissement. Le profil de sommeil est modifié de façon persistante.

Les auteurs concluent que les effets du son audible sur le sommeil sont objectivables. Des études complémentaires sur les infrasons ou les bruits basses fréquences sont nécessaires pour conclure à l'existence d'interférences.

Une étude expérimentale, portant sur 15 sujets, avait pour objectif d'identifier le spectre du bruit des éoliennes et d'enregistrer leurs répercussions sur les ondes cérébrales (Inagaki, Li, et Nishi 2014). Les enregistrements, atteignant des intensités de 55 à 60 dBA, sont volontairement réalisés près des pâles pour reproduire la situation d'ingénieurs techniques sur site. Dans le spectre, ils notent une augmentation de la densité spectrale dans plusieurs zones : 1-10 Hz avec un pic à 1,75 Hz correspondant à la vitesse de rotation d'une pale, 86-335 Hz avec un pic à 172 Hz, 1 500-2 000 Hz. Les méthodologies sont bien décrites. Les sujets, les yeux fermés, sont installés dans une pièce calme, les hauts parleurs à 1,3 m de distance en face d'eux. Les EEG, enregistrés pendant 5 minutes, permettent de comparer ce bruit d'éolienne à des sons stimulus périodiques de fréquences égales à 20, 30, 86 et 300 Hz, pour des intensités identiques de 50 ou 55 dBA. Un EEG témoin a été réalisé. Le taux induit par un stimulus pour chacune des ondes cérébrales est calculé par comparaison au taux basal de cette onde les yeux fermés, dans un milieu calme. Le taux d'occupation d'une onde est normalisé par rapport au taux d'occupation total de l'ensemble des ondes cérébrales. Quelle que soit l'exposition, la diminution du nombre induit des ondes alpha 1 (8 à 10 Hz) est la plus importante. Cette baisse est maximale dans la bande de fréquence de 20 Hz. Conjointement, l'augmentation des ondes béta (13 à 20 Hz) est maximale à 20 Hz. Aucune modification n'a été observée pour les ondes théta (4-8 Hz). Les ondes alpha 1 correspondant à la présence d'un état de relaxation et les ondes béta à une situation d'éveil, les yeux théoriquement ouverts, les auteurs concluent que les individus ne peuvent pas être relaxés lorsqu'ils écoutent ces IBF.

Cette étude, qui objective un effet détecté à l'EEG suite à l'écoute d'IBF, mériterait d'être reconduite sur un nombre de sujets plus importants et avec des temps d'exposition variables pour observer le comportement des ondes cérébrales dans des conditions similaires à l'exposition par des éoliennes.

L'objectif de l'étude de Li *et al.* était de corréler le score de nuisance de différents bruits à des modifications des enregistrements EEG chez des sujets (Li, Di, et Jia 2014). Les auteurs ont utilisé un bruit blanc et des sons purs de fréquences 160, 500 et 4 000 Hz à 70 dB. Chaque fréquence a été enregistrée 3 fois. Les électrodes ont été placées sur les deux hémisphères en position frontale, pariétale, occipitale et temporale. Deux électrodes sur le pavillon de l'oreille ont servi de référence. Un enregistrement préalable, les yeux fermés, en état de forte concentration, permet de valider l'inclusion des 12 sujets. Les résultats sont exprimés par normalisation à l'EEG de référence, en pourcentage. Les sujets évaluent leur gêne grâce à un score variant de 1 à 10.

Des expositions de 1 à 6 secondes à des sons purs ne permettent pas de conclure.

Pour des temps d'expositions inférieurs à 5 minutes, le pourcentage relatif des ondes théta et des ondes alpha augmente progressivement. Ces variations des EEG se stabilisent avec la durée de l'exposition. La plus grande sensibilité (pourcentage de chacune de ces deux ondes séparément, ou de leur somme) est observée pour le bruit blanc et les sons de 4 000 Hz, puis diminue parallèlement à la fréquence.

L'augmentation relative de la somme du nombre des ondes theta et alpha 1 est corrélée au degré de gêne. Dans cette étude, qui ne concerne pas les infrasons, les auteurs observent de plus que la sensibilité est la plus faible pour les basses fréquences et trouvent un index d'objectivation de la gêne qui serait à confirmer.

He *et al* ont mené une étude dont la méthodologie et les résultats ne sont pas toujours définis (He, Leickel, et Krahé 2015). Ils trouvent une corrélation significative entre la gêne sonore déclarée (questionnaire) et des paramètres de la mesure de l'activité encéphalique (EEG). L'exposition ne concerne pas les IBF mais un bruit blanc de 40 dB sans infrasons du fait d'un filtre passe bas 20 Hz. L'intérêt de cette étude est de pouvoir objectiver l'impact visuel négatif sur la gêne. Celle -ci est plus importante lorsqu'un plus grand nombre d'éoliennes est visible.

Kasprzak a comparé les EEG au repos de 33 sujets avec ceux obtenus chez ces mêmes personnes après 20 minutes d'exposition soit d'un spectre éolien filtré au dessus de 20 Hz (91,6 dB ou 39,2 dBA) , soit d'un son pur de 13 Hz dont l'intensité n'est pas renseignée.(C. Kasprzak 2014, Cezary Kasprzak 2014). Il observe également les variations de l'humeur chez ces sujets évaluées à l'aide du test de Thayer différenciant les états d'activité en quatre catégories. Il constate suite à l'exposition au son pur de 13 Hz une augmentation de l'amplitude de l'onde d'activité cérébrale 8–12 Hz, permettant en condition normale de repos, une mémorisation des acquis. Avec le spectre sonore éolien filtré, il ne trouve aucune différence significative entre les enregistrements des EEG. Il observe cependant une modification de l'humeur correspondant à un niveau d'agitation élevée. Ces résultats peuvent etre mis en parrallèle de celui obtenu avec le son de 13 Hz.

Auparavant en 2010, Kasprzak avait étudié les effets d'une exposition de 20 minutes à un son de 7 Hz et d'intensité élevée (120 dB) sur la fréquence cardiaque et les pressions artérielles (Kasprzak 2010). Même à ce niveau d'intensité, il n'a observé aucune modification des pressions systoliques comme diastoliques. Seule une faible augmentation de la fréquence cardiaque a été notée

6.3.4.2.5 Conclusion

Concernant l'exposition aux ondes sonores aériennes :

- les durées d'exposition courtes pratiquées dans la plupart de ces études sont peu compatibles avec les expositions continues auquelles sont soumis les riverains d'éoliennes.

Or, aucun consensus n'existe quant aux limites acceptables pour une exposition prolongée ;

- le contenu spectral étudié n'est pas toujours bien caractérisé du fait de l'absence de standardisation des appareils et des conditions de mesure. Les études sont donc souvent difficilement comparables entre elles ;
- ces études montrent également la nécessité de modes opératoires plus homogènes pour interpréter des enregistrements tels que les polysomnogrammes ou d'autres méthodes d'imagerie qui permettent une objectivation de la gêne déclarée.

Concernant les autres types d'exposition :

- lorsque des vibrations sont responsables d'expositions infrasonores il s'agit de vibrations répétitives, transmises par les milieux solidiens (murs et sol), à des intensités plus élevées que celles émises par les éoliennes.

6.3.5 Effets des basses fréquences - synthèse des données cliniques et expérimentales

Peu d'études scientifiques recensées se sont exclusivement intéressées aux effets sur la santé découlant de l'exposition aux sons basses fréquences que pourraient produire les éoliennes. Il existe par ailleurs peu d'études publiées et révisées (soumises à comité de lecture) sur la problématique des basses fréquences. Il a néanmoins été établi qu'il faut un niveau sonore beaucoup plus élevé par rapport aux fréquences plus hautes pour entendre un son basse fréquence. Par exemple, si à 200 Hz le seuil d'audition moyen pour une personne jeune sans pathologie est de 14 dB, il sera de 44 dB à 50 Hz et atteindra 107 dB à 4 Hz (Leventhall, Pelmear, et Benton 2003).

Plusieurs auteurs ont montré que, pour un même niveau sonore quantifié en dBA, les bruits comprenant plus de basses fréquences ont étés déclarés plus gênants par les auditeurs (Pawlaczyk-Luszczyńska *et al.* 2003, Persson et Björkman 1988). Cependant, ces recherches portent sur divers bruits professionnels tels que des bruits de ventilation ou de pompes à chaleur. L'extrapolation de ces résultats au cas des éoliennes doit donc être effectuée avec prudence, car les bruits étudiés ont des caractéristiques différentes des spécificités du bruit éolien : modulation d'amplitude, bruits de basses fréquences audibles et non audibles mélangés, etc.

Plus récemment, dans une étude expérimentale, Yokoyama *et al.* montrent que les facteurs de modulation d'amplitude et de composante tonale de bruits basses fréquences (10–125 Hz) issus d'enregistrements de bruits éoliens, doivent être considérés en plus de la bruyance pour l'évaluation psycho-acoustique du bruit des éoliennes (Yokoyama, Sakamoto, et Tachibana 2013, 2014, Yokoyama *et al.* 2015). Les auteurs concluent que l'évaluation des seuils de perception sonore varie suivant le filtre utilisé. Cette évaluation est plus stable avec le filtre A (dBA) contrairement aux autres filtres testés (C dBC, filtre linéaire Z dBL et le filtre G construit pour les éoliennes dBG), suggérant ainsi que le filtre A est plus adapté aux évaluations de perception sonore des bruits basses fréquences issus de bruits éoliens, en tenant compte des facteurs de corrélation.

Selon Persson Waye, si le niveau de bruit en dBA n'est pas prédictif de la gêne pour des signaux riches en basses fréquences (Persson et Björkman 1988), il semble l'être davantage avec les filtres de pondération B et C (Persson Waye et Rylander 2001). Les auteurs trouvent des prévalences de gêne et de troubles de la concentration significativement plus élevées chez les personnes exposées à des bruits de ventilation et de pompes à chaleur (basses fréquences) par rapport aux personnes exposées à des bruits de fréquences moyennes, la gêne étant probablement liée au niveau de pression des basses fréquences dominantes du bruit. Cette hypothèse est en cohérence avec les observations plus récentes de Pawlaczyk-luszczynska *et al.* qui observent les déclarations de gêne sonore auprès de sujets exposés à divers bruits stationnaires de différents niveaux sonores (de 45 à 67 dBA) et de différentes durées (30 ou 75 s

par stimulus sonore). Ils constatent alors l'existence de relations entre l'exposition à des basses fréquences, exprimées en dBA et dBC et la gêne (Pawlaczyk-Luszczynska *et al.* 2010). Néanmoins, ils soulignent la forte influence de la sensibilité individuelle sur la gêne liée à ces basses fréquences, mais ne constatent pas de différence marquée liée à l'âge ou au sexe des individus.

Aucune différence de prévalence des effets médicaux (nausée, maux de tête, stress, irritabilité, etc.) et psychosociaux (fatigue physique ou mentale, bien être, etc.) n'est observée entre les deux groupes exposés, l'un aux basses fréquences, l'autre à des fréquences moyennes (Persson Waye et Rylander 2001). Cependant, ces effets sont plus importants chez ceux qui se déclarent gênés. Les auteurs en déduisent une possible relation entre ces symptômes et la gêne auto déclarée. Ils observent également que la gêne due à une installation est inversement proportionnelle au bénéfice qu'en fait la personne exposée. En effet, en comparant la gêne sonore liée au trafic routier à celle liée aux bruits générés par des installations de types ventilation, pompes à chaleur (K. Persson Waye *et al.* 2003) ou compresseurs et réfrigérateurs (Findeis, Peters, et others 2004), ces auteurs trouvent que la gêne déclarée par les personnes soumises au bruit de ces installations est très supérieure à celle liée au trafic routier. Pour ces auteurs, les fréquences en dessous de 100 Hz seraient également les plus gênantes.

Là encore, l'extrapolation de ces résultats au cas des éoliennes doit être faite avec prudence. Il n'existe pas non plus de consensus pour ce qui a trait aux limites acceptables pour une exposition prolongée. En effet, Morris *et al*. considèrent que des sons provenant des éoliennes, même s'ils ne sont pas audibles pour la majorité des individus, peuvent apporter une gêne sonore après de longues périodes d'exposition, pour des personnes particulièrement sensibles et qui vivent dans un milieu naturel très silencieux (SouthAustralia-EPA 2013).

Il n'existe donc aucune étude scientifique qui évalue en particulier les effets sur la santé découlant de l'exposition aux seuls sons basses fréquences produits par les éoliennes. Pour ce qui concerne les bruits basses fréquences provenant d'autres sources exclusivement basses fréquences, la gêne autodéclarée (questionnaire) constitue le seul effet sanitaire observé.

Cependant, contrairement à ces sources, les éoliennes ne génèrent pas exclusivement des bruits basses fréquences, leurs spectres d'émission mêlent en effet infrasons, basses fréquences et bruit à plus hautes fréquences. Par conséquent, même si les niveaux sonores d'exposition sont d'un ordre de grandeur comparable, l'extrapolation de ces résultats au cas des éoliennes n'est pas complètement pertinente.

6.4 Revue des préoccupations sanitaires associées aux basses fréquences et infrasons liés aux éoliennes

6.4.1 Vibroacoustic disease (VAD)

Comme indiqué précédemment (cf. § 2.5.2), la VAD a été décrite initialement chez des militaires, des pilotes d'hélicoptères et des techniciens de l'aéronautique exposés à des sons et des vibrations basses fréquences, de haute intensité (de 90 à 130 dBA) et pour des temps d'exposition longs et répétés.

Les symptômes rapportés par les auteurs (Alves Pereira et al.) chez ces personnes incluent des perturbations de l'humeur telles que la colère, la dépression et l'agressivité, des modifications biochimiques de la matrice extracellulaire telle que l'épaississement de la paroi des vaisseaux sanguins, responsables de pathologies cardiovasculaires et de fibroses pulmonaires ou même de tumeurs pulmonaires.

Notons qu'à la suite d'une plainte de riverains d'éoliennes, cette équipe de recherche a présenté un rapport *« identifiant formellement le VAD ainsi que la responsabilité sans équivoque des éoliennes à proximité des habitations »*[79] *en se basant sur les résultats provenant de ses études réalisées chez les pilotes.* À la suite de ce rapport, *la Cour Suprême portugaise a ordonné le démantèlement des éoliennes en question* dans son jugement du 30 mai 2013[80].

Cependant, les membres du groupe de travail s'accordent sur le peu de crédibilité de ces travaux concernant la VAD. Ces articles étant néanmoins cités à de nombreuses reprises par des parties prenantes sur le sujet des éoliennes, il est nécessaire de les étudier (cf. annexe 9) en précisant les arguments objectifs justifiant ce point de vue. Ces arguments sont les suivants.

Le premier argument est d'ordre méthodologique. Les publications de ces auteurs comportent des biais méthodologiques majeurs. Leurs conclusions reposent notamment sur des images de microscopie, réalisées sur très peu de cas, sans aucune analyse statistique. Par ailleurs, ces résultats ne sont pas en cohérence avec ceux d'autres auteurs (cf. annexe 9) ayant cherché à montrer, mais sans succès, ces effets sanitaires chez des individus fortement exposés (pilotes d'hélicoptères, etc.).

Le second argument concerne les nombreuses publications de cette équipe. Tout d'abord, seuls quelques articles sont des articles sources, les autres étant des synthèses de ces travaux ou des opinions. En outre, la grande majorité des travaux de cette équipe n'ont été publiés que dans des revues qui ne sont pas soumises à comité de lecture et n'ont donc pas été validés par des pairs. Par ailleurs, à partir de l'étude de 1980, ces auteurs s'auto-citent à de nombreuses reprises (74 % des références en 2013) (Chapman 2011, 2012, Chapman et St George 2006, 2013, Goujard 2002).

Enfin et surtout, ces travaux ne reposent en aucune façon sur des méthodologies expérimentales permettant d'attribuer la VAD aux infrasons produits par les éoliennes, expositions environnementales bien plus faibles que celles qui ont été initialement reliées à la VAD par ces auteurs, notamment dans le cadre professionnel, et qui étaient associées à des fortes vibrations.

6.4.2 Syndrôme éolien (WTS)

▶ Symptômes généraux

Comme mentionné au paragraphe 2.5.1, le *Wind Turbine Syndrome* (WTS), ou syndrome éolien, a été défini pour la première fois par Pierpont en 2009. Il regroupe différents symptômes non spécifiques : maux de tête, perturbations du sommeil, stress, acouphènes, sensations de pression anormale dans les oreilles, etc.), reliés par leurs auteurs au bruit éolien (audible et/ou inaudible).

Les travaux de recherche concernant la mise en évidence d'une altération sensorielle par les infrasons pour expliquer ces symptômes restent, à ce jour, peu concluants. Ils ont été effectués pour des intensités élevées (16 Hz, 130 dB (Cheng *et al.* 2012, Yuan *et al.* 2009)), souvent pour des fréquences sonores audibles (bruit blanc, 95 dB), (Uran, Caceres, et Guelman 2010), et généralement avec des ventilateurs comme source d'infrasons.

Si les symptômes décrits par les personnes ne sont pas à mettre en cause, le lien de causalité directe entre l'exposition aux infrasons, en particulier ceux émis par des éoliennes, et les effets somatiques n'a pas été démontré.

[79] https://docs.wind-watch.org/vad-press-release-070531.pdf

[80] décision n°2209/08.OTBTVD.L1.S1

▶ Effets somatiques du stress et syndrôme éolien

L'exposition prolongée au stress peut être pathogène. L'organisme répond à cette stimulation par le déclenchement d'un ensemble de réactions physiologiques plus ou moins spécifiques et variables selon les individus. Suite à des stimuli objectivables ou imaginés, un stress ponctuel est créé par le cerveau. Cette information sensorielle est transmise au cortex et au système limbique[81] qui vont analyser la situation en fonction des expériences passées. Le système limbique, *via* l'hypothalamus et la formation réticulée, active le système nerveux autonome mis en jeu dans des situations de « fuite ou attaque ». Le système nerveux autonome contrôle simultanément les réponses de plusieurs organes, des vaisseaux sanguins et des glandes. Dans celui-ci, la stimulation du système sympathique augmente la fréquence cardiaque, la respiration, la pression sanguine, la mobilisation d'énergie et diminue l'activité des fonctions digestives comme celles de la reproduction.

La stimulation de l'axe hypothalamo-hypophysaire aboutit, au final, à la libération de cortisol par les glandes surrénales. Les glucocorticoides ont de nombreuses actions permettant de diriger l'apport d'énergie (glucose, oxygène) vers les organes vitaux (cœur, cerveau) :

- des effets métaboliques comme l'augmentation de la néoglycogénèse hépatique et de la lipolyse ou la diminution de la consommation de glucose « inutile » dans les viscères ;
- des effets cardiovasculaires et respiratoires ;
- des effets d'inhibition du système immunitaire ;
- et enfin des effets cérébraux.

Ces répercussions constituent tout un panel de lésions biologiques véritables, à des degrés variant en fonction de l'histoire biologique et psychique de l'individu. Des expositions prolongées ou répétées au stress entraînent un état d'épuisement biologique (baisse de la glycémie), neurophysiologique et psychique. L'investigation clinique est complexe car les rétroactions neurofonctionnelles et métaboliques s'auto-amplifient ou, *a contrario*, s'inhibent. Un véritable cercle vicieux est enclenché, dans lequel les manifestations cognitives conscientes d'état de peur, d'alerte ou de vigilance vont avoir des effets bidirectionnels sur les réseaux neuronaux et endocriniens.

De plus, au niveau neuronal, la stimulation du système limbique, par le stress, correspond à une activation des neurones, à une phase d'amplification des décharges synchronisées, synchronisation qui joue un rôle important dans la plasticité cérébrale.

Tous ces mécanismes peuvent expliquer les résultats contradictoires des mesures des taux de cortisol réalisées expérimentalement dans des conditions variables de stress.

▶ Conclusion

En conclusion, il semble que les manifestations du *Wind Turbine Syndrome* recouvrent en partie celles liées au stress. Si des manifestations somatiques sont bien en lien avec une perception, l'attitude face à un stress reste difficile à évaluer du fait des multiples interactions. Il est aujourd'hui impossible d'isoler les infrasons et basses fréquences sonores émis par une installation d'un champ d'éoliennes pour leurs attribuer la responsabilité du stress déclaré par certains riverains.

Cependant, lorsqu'une personne pense pouvoir contrôler la situation stressante, le système des réseaux neuronaux (apprentissage..) crée un rétro contrôle (*feed back*) inhibiteur du stress sur le

[81] Le système limbique est un groupe de structures interconnectées et impliquées dans l'émotion, l'apprentissage et la mémoire. Il comprend différentes structures du lobe limbique (amygdale, hippocampe et cortex limbique) et des structures reliées au thalamus et au cortex, intervenant dans l'émotion. Le syndrome d'adaptation consiste en des réponses neuronales, endocrines, métaboliques et comportementales visant normalement à protéger l'organisme.

système limbique. Si cette personne pense subir cette même situation stressante, la stimulation des réseaux neuronaux aboutit cette fois à une amplification du stress, des perceptions sensorielles et des manifestations cliniques. Les avancées en neuro-imagerie font émerger la capacité de corréler l'activité du cerveau d'une personne avec les états psychologiques conscients ou inconscients et leurs répercussions somatiques. Cette nouvelle approche est à l'origine d'études dites de « *neuro-économie* ».

6.4.3 Effets nocebo

L'effet *nocebo* peut être défini comme l'ensemble des symptômes ressentis et présentés par un sujet soumis à une intervention « vécue comme négative » qui peut être un médicament, une thérapeutique non médicamenteuse ou une exposition à des facteurs environnementaux tels que les infrasons et basses fréquences sonores par exemple. Cet effet est l'opposé de l'effet *placebo*, défini initialement en médecine comme « *Substance améliorant les symptômes présentés par un malade alors que son efficacité pharmacologiquement prévisible devrait être nulle ou négligeable* ». L'effet du vecteur varie dans les deux cas selon l'attente du sujet.

La nature qualitative d'un risque influence le niveau de préoccupation des individus. L'Afnor définit le bruit comme « un phénomène d'acoustique n'ayant pas de composante définie et produisant une sensation ». Le lien avec la perception serait donc bien indissociable du phénomène du bruit.

Un grand nombre de facteurs impactent l'incidence et/ou l'intensité de l'effet *nocebo*. Ces facteurs tiennent en premier lieu au sujet lui-même et à son vécu : « La poursuite, longtemps après la naissance, de la prolifération synaptique, permet une « imprégnation » progressive du tissu cérébral par l'environnement physique et social » (Changeux 2012). Ainsi, le niveau socioculturel, les expériences antérieures, peuvent modifier la construction identitaire. En deuxième lieu, le traitement d'un signal par les aires cérébrales est lié à la compréhension des messages véhiculés par l'environnement, par les médias comme à la perception des évènements extérieurs. J.D. Vincent *et al.* expliquent que « *l'homme neuronal et l'homme hormonal marchent main dans la main,… en vue de maintenir l'homéostasie et la bonne gouvernance des multiples régulations somatiques* ». Benedettti *et al.* ont montré que l'axe hypothalamo hypophysaire était stimulé par un effet *nocebo*, alors qu'une atteinte du cortex préfrontal était associée à une diminution de l'effet *placebo* (Benedetti 2013, Benedetti et Amanzio 2013, Benedetti, Carlino, et Pollo 2011).

Le rôle de l'effet *nocebo* peut être illustré par l'étude de Persson Waye *et al*. (Persson Waye et Ohrstrom 2002) ainsi que par celles de Wolsink (Wolsink 2000). Persson Waye *et al.* ont étudié la gêne et la détectabilité d'enregistrements de bruit d'éoliennes de petites tailles, auprès de 25 individus d'audition contrôlée (40 dBA en L_{Aeq}). Les auteurs concluent que la gêne et la détectabilité du bruit éolien dépendent pour un même niveau donné de bruit de sa nature, de son spectre fréquentiel, du pourcentage de chacune des fréquences. Les sujets étaient des étudiants non confrontés auparavant au bruit des éoliennes et sans attente de gêne particulière. Les auteurs ne trouvent aucune corrélation entre la gêne déclarée dans un questionnaire, identique à celui utilisé par Wolsink, et des paramètres psychoacoustiques.

Dans des études réalisées entre 1988 et 2016, Wolsink *et al.* ont observé l'importance de l'attitude positive vis-à-vis des éoliennes, aussi bien chez des groupes contrôles que dans des groupes avant et après installation d'une éolienne. Ils ont aussi montré que l'acceptation d'un projet d'installation des éoliennes, comme de toutes autres modifications du paysage, est dépendant des politiques locales, des approches collaboratives et des consultations pré-décisionnelles. La manière dont un risque avéré et/ou supposé est traité par les diverses instances en présence modifie donc le comportement, le stress et les manifestations somatiques qui en découlent.

« *Nos décisions sont entachées de nombreux biais qui les écartent manifestement de toute rationalité* », écrivent D Kahneman et Amos Tversky qui ont eu en 2002 le prix Nobel d'économie « comportementale » (Kahneman et Tversky 1979). L'être humain procède par associations, cherchant des relations de cause à effet qui ne s'appuient que sur du particulier. C'est notamment le cas de la VAD : l'équipe d'Alves-Pereira a proposé une relation causale entre les infrasons et

basses fréquences sonores émis par les éoliennes et des pathologies, en extrapolant les résultats qu'ils avaient obtenu chez des pilotes d'hélicoptères. Cette équipe s'est ensuite largement auto-citée, ce qui a renforcé le sentiment de véracité de ses résultats, qui se sont ensuite propagés dans la population. Kahneman, mais aussi Wolsink et Chrichton ont montré que la manière de présenter une problématique influe grandement sur les décisions. Dans une étude de 2014, Chrichton *et al.* ont comparé deux groupes d'individus : des documents anxiogènes relatifs aux infrasons et basses fréquences sonores ont été présentés au premier groupe mais pas au second (Crichton, Dodd, Schmid, Gamble, et Petrie 2014). Les participants du premier groupe ont déclaré plus de symptômes (recouvrant ceux du WTS), en nombre et en intensité, après exposition nulle comme après exposition aux infrasons. Les périodes d'exposition ou non ont été réalisées en double aveugle. Il faut noter que cette étude n'est pas directement transposable aux infrasons des éoliennes, car les participants sont exposés à un son de 5 Hz, de 40 dB pendant 10 minutes. Les auteurs concluent que les attentes psychologiques d'effets pourraient expliquer le lien entre exposition aux éoliennes et plaintes déclarées.

Crichton *et al.,* en 2015, se sont ensuite intéressés aux effets sur la santé après une information d'un possible effet *nocebo (Crichton et Petrie 2015)*. Les 66 participants ont été répartis au hasard en deux groupes. Une explication physiopathologique des syndromes pouvant survenir a été présentée au premier groupe, tandis que les diverses causes possibles d'un effet *nocebo* ont été expliquées au second groupe. À la fin du test, les explications sont inversées. Les conditions d'exposition sont les mêmes que pour l'étude précédente. Les questionnaires d'atteinte de l'humeur et ceux reprenant les symptômes du WTS ont été remplis après les deux expériences. Les effets sur la santé (WTS) et sur l'humeur sont directement corrélés au type d'explication donnée et s'inversent dans les deux cas. Les conclusions de cette dernière publication, à savoir la moindre déclaration de symptômes après la présentation d'un mécanisme *nocebo* sont cependant à relativiser, car elles peuvent être expliquées de deux façons : les personnes ne les ressentent-elles plus ou bien n'osent-elles plus les déclarer ?

Ces travaux de très bonne qualité montrent l'influence des attentes de santé sur les effets subjectifs déclarés. Cette étude pourrait être reconduite auprès de riverains pour lesquels les enjeux liés à l'habitat seraient pris en compte. Crichton *et al.* Ainsi que Tonin et al. ont montré expérimentalement la pertinence de l'effet *nocebo* pour les infrasons des éoliennes (Tonin, Brett, et Colagiuri 2016).

Sur un plan statistique, supposons qu'un tel effet affecte aléatoirement 1 individu sur 100 ou 1 000 (Crichton, Dodd, Schmid, Gamble, Cundy*, et al.* 2014). La multiplication importante et régulière du nombre de parcs éoliens sera en partie statistiquement responsable de l'augmentation du nombre de personnes gênées avec l'implantation des éoliennes.

Enfin, les caractéristiques physiques des infrasons, basses fréquences et vibrations (non observables, invisibles, les infrasons sont souvent inaudibles en tant que tels),participent à l'amplification du risque psychologique. La caractérisation physique des IBF par des mesures adaptées (Ziaran et al.) et la recherche de solutions pour minimiser l'intensite de ces sons pourraient modifier la perception de ce risque.

Des recherches sur l'impact de la personnalité d'un sujet entre la perception des bruits éoliens et les symptomes rapportés commencent à émerger. Taylor en 2013 montre ainsi l'importance de ce lien. Ses travaux sont à mettre en parallèle avec les études qui débutent en neuroimagerie (Taylor *et al.* 2013).

Pour Jakovlejic, les réactions *nocebo/placebo* forment une aire de convergences entre le physiologique, le psychologique, le social, le spirituel, l'anthropologique mis en jeu dans la survenue des pathologies ou du maintien de la santé (Jakovljevic 2014). Les travaux d'imagerie en résonance magnétique fonctionnelle sont difficiles à mettre en œuvre avec les infrasons et basses fréquences sonores. Skouras (2013*) et al.* ont mis en évidence l'interférence produite par les bruits de ces machines (IRM, scanner) avec des stimuli psychoacoustiques (Skouras *et al.* 2013). Ils ont observé une modification des aires d'activations neuronales dans le cortex auditif, le cortex visuel

et le cortex insulaire. Les études d'imagerie IRM sur l'insula montrent que ces différentes aires participent respectivement aux mécanismes de sensations somatiques et de la douleur, aux mécanismes de la cognition tels que l'attention, le langage et la mémoire, aux émotions et aussi à l'olfaction et à la gustation (Kurth *et al.* 2010). Le développement des neurosciences ainsi que l'amélioration des matériels permettront peut-être de trouver des solutions techniques pour visualiser les circuits neuronaux mis en jeux dans les problématiques mentionnées ci-dessus.

En conclusion, la propagation d'un effet *nocebo* des éoliennes dans la population ne peut être éliminée. Son impact sur la santé physique comme psychique sera d'autant plus important que le nombre d'éoliennes ira en augmentant.

7 Conclusions et recommandations

7.1 Conclusions du groupe de travail

▶ Rappel du contexte

Les aérogénérateurs, couramment appelés éoliennes, regroupées le plus souvent en parcs éoliens, sont considérés comme des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) soumises à autorisation préfectorale[82]. Par conséquent, ces parcs doivent faire l'objet d'une étude d'impact préalable à leur construction, incluant notamment l'impact sanitaire, et doivent respecter la réglementation ICPE en vigueur durant leur exploitation (voir § 3.1).

Les éoliennes peuvent être source de bruit. Les expositions sonores sont réglementées à l'aide de valeurs limites du bruit audible (niveaux sonores et émergences exprimées en dBA) à ne pas dépasser. La réglementation ICPE prévoit également une distance minimale d'éloignement des habitations de 500 m. Cependant, diverses contraintes, dont celle du bruit, entrainent souvent l'installation de ces éoliennes à des distances des habitations supérieures à cette distance minimale.

En dépit de cette réglementation spécifique à l'impact du bruit audible des parcs éoliens, des plaintes de riverains ont été exprimées à proximité de plusieurs de ces installations, en lien avec les infrasons et basses fréquences sonores émis par les éoliennes.

La quantification rigoureuse des plaintes concernant réellement les infrasons et basses fréquences sonores émis par les éoliennes (en nombre ou en pourcentage de plaintes) s'avère complexe. Le groupe de travail souligne que l'ensemble des témoignages de riverains et des plaintes, qui ont fait l'objet de rares recensements, rapportent essentiellement des symptômes ressentis et/ou constatés, que les plaignants attribuent eux-mêmes aux éoliennes. Cependant, ces personnes ont généralement du mal à désigner la nature exacte de la nuisance liée à l'éolienne (bruit audible, infrasons, effets stroboscopiques, vibrations, etc.). La confusion possible entre infrasons (généralement inaudibles) et modulation d'amplitude peut, par exemple, amener certains riverains à désigner comme infrasons un bruit faiblement audible mais dont l'amplitude du niveau sonore est modulée suivant une fréquence de l'ordre de quelques Hertz.

Sans préjuger de la gêne exprimée par les plaignants, un décalage semble exister entre les informations relayées par différentes sources (media, presse ou littérature non spécialisés) et le nombre réel de riverains rapportant des symptômes qu'ils attribuent aux éoliennes.

▶ Exposition des riverains aux infrasons et basses fréquences sonores émises par les éoliennes

La mesure de l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores des riverains des parcs éoliens comporte de multiples complexités, notamment à l'intérieur des habitations (voir § 2.2.3). Elles sont :

- de nature métrologique : étalonnage complexe et insatisfaisant pour les très basses fréquences, bruit de fond instrumental plus élevé aux basses fréquences ;

[82] Pour les éoliennes de hauteur dépassant 50 m, c'est-à-dire la plupart des parcs éoliens en France.

- de nature organisationnelle : l'absence de norme technique à l'heure actuelle limite la pertinence des comparaisons entre les mesures effectuées par différentes équipes, et ne garantit pas la qualité des pratiques. Par exemple, le choix de l'appareillage utilisé et des bandes de fréquences étudiées conditionne fortement ces résultats. Un projet de norme concernant la mesure des infrasons pour toutes les sources sonores est actuellement en cours de publication par l'Afnor[83] ;
- en lien avec les spécificités de la source sonore et de son environnement : le signal sonore fluctue avec le temps suivant différents facteurs dont certains sont bien identifiés (vitesse de vent, topographie, etc.) et d'autres restent indéterminés ou peu contrôlables (turbulence du vent au niveau des pales ou du milieu de propagation, gradients de température locaux, etc.).

Malgré toutes ces difficultés, les campagnes de mesures pilotées par le groupe de travail et réalisées à proximité de trois parcs éoliens permettent d'établir les constats suivants :

- les éoliennes sont des sources de bruit dont la part des infrasons et basses fréquences sonores prédominent dans le spectre d'émission sonore. D'après la littérature scientifique, ces composantes IBF augmentent avec la taille du rotor de l'éolienne ;
- les résultats des mesures de l'émission sonore des éoliennes confirment les tendances observées dans la littérature scientifique :
    - la forme générale du spectre d'émission du bruit éolien (décroissance quasi linéaire du niveau sonore avec le logarithme de la fréquence) est retrouvée sur tous les sites avec peu de différences notables. Quelques raies fréquentielles, probablement attribuables au bruit mécanique dans la nacelle, ont été relevées dans la partie IBF du spectre ;
    - plus la vitesse du vent augmente, plus l'émission sonore IBF augmente, jusqu'à un maximum théorique qui n'a pas pu être observé lors des campagnes de mesure (faute de vitesses de vent suffisamment élevées).
- les résultats des mesures de niveaux sonores à 500 m et 900 m (riverains) confirment les tendances observées dans la littérature scientifique pour 2 sites sur les 3 explorés[84] :
    - une forte dispersion des mesures en fonction du temps pour un parc éolien et un régime de vent donné. D'autres facteurs difficilement contrôlables (turbulence ponctuelle du vent, contamination par d'autres sources sonores, etc.) peuvent avoir une influence non négligeable sur le bruit mesuré ;
    - aucun dépassement des seuils d'audibilité pour des domaines de fréquences IBF n'a été constaté (< 50 Hz) ;
    - des niveaux sonores dépassant ponctuellement[85] la courbe théorique de Salt *et al.* ont été observés à l'extérieur des habitations, pour des fréquences inférieures à 20 Hz. D'après ces auteurs, le dépassement de ces niveaux sonores serait susceptible de générer une stimulation nerveuse au niveau de l'appareil cochléovestibulaires. Des travaux seraient à conduire pour valider cette hypothèse (voir § 6.3.2) ;
- les infrasons et basses fréquences sonores mesurés à l'intérieur des habitations, dans des conditions où les éoliennes fonctionnaient avec les vitesses de vent les plus élevées rencontrées au cours des mesures, sont inférieurs au seuil d'audibilité (ISO 266).

[83] Pr NFS 31-135.

[84] La contribution sonore des éoliennes au niveau du riverain du site 2 n'a pas pu être établie de façon claire, ce qui a conduit à écarter ce site des analyses.

[85] De quelques % du temps à 8 Hz, à 20 % du temps pour 20 Hz à une distance de 500 m de l'éolienne. Aucune fréquence en dessous de 8 Hz ne dépasse les différents seuils.

Le groupe de travail souligne que les mesures effectuées en dBA, qui sont celles préconisées par les normes, sont effectivement inadaptées à la mesure des IBF. Cependant, la forme particulière du spectre sonore éolien entrainant une proportionnalité entre le contenu spectral mesuré en dBA et le contenu spectral de la partie infrasons et basses fréquences sonores, des informations pertinentes concernant l'exposition aux IBF peuvent être obtenues à partir de données d'exposition mesurées en dBA. Cette constatation du groupe rejoint celles dressées par des études récentes.

Par conséquent, des données d'émission ou d'exposition correctement mesurées en dBA et disponibles dans la littérature peuvent être indicatives des niveaux sonores des IBF et pourraient être exploitées comme telles.

Ainsi, compte tenu des spectres d'émission des éoliennes actuelles, la limitation d'un niveau sonore en dBA entraîne également une limitation du niveau sonore dans la partie des IBF. De ce fait, en matière de gestion, un seuil bien choisi en dBA en limite de propriété garantirait également une limite d'exposition aux infrasons chez le riverain.

- **Effets des infrasons et basses fréquences sonores sur la santé : exploitation des connaissances scientifiques disponibles**

Un déséquilibre entre sources bibliographiques primaires et secondaires

Un examen des données disponibles concernant les effets sanitaires des infrasons permet de constater un fort déséquilibre entre les sources bibliographiques primaires (documents relatifs à des expériences ou études scientifiques originales) et secondaires (revues de la littérature scientifique ou articles d'opinion). En effet, les sources secondaires sont nombreuses alors que le nombre de sources primaires qu'elles sont censées synthétiser est limité. Cette particularité ajoutée à une divergence très marquée des conclusions de ces revues montre clairement l'existence d'une forte controverse publique sur cette thématique.

Bien qu'ayant pris connaissance de l'ensemble des éléments issus de la recherche bibliographique, le groupe de travail a adopté une méthode de travail consistant à analyser uniquement les sources primaires disponibles afin d'effectuer lui-même une revue systématique de la littérature.

Particularités des symptômes rapportés

Le groupe de travail souligne la très forte diversité des symptômes mentionnés dans les témoignages de riverains et la littérature scientifique. Ces effets sanitaires rapportés sont souvent classés en deux catégories :

- ceux associés à la « *vibroacoustic disease* » (VAD) ;
- ceux constituant le « syndrome éolien » (« *wind turbine syndrome* » - WTS).

La VAD a été définie par une unique équipe de recherche et désigne un mécanisme d'effets biologiques particulier lié à l'exposition aux IBF (croissance de matrices extracellulaires de type collagène et élastine, en l'absence de tout processus inflammatoire). Ce mécanisme pourrait conduire à terme, selon ces auteurs, à l'apparition d'une large diversité d'effets sanitaires (fibroses, atteintes du système immunitaire, effets respiratoires, effets génotoxiques, modifications morphologiques d'organes, etc.).

Le groupe de travail a attribué un très faible niveau de preuve à cette hypothèse de mécanisme d'effets sanitaires en raison, d'une part, de la faible plausibilité scientifique associée à ce mécanisme notamment pour les faibles expositions sonores et/ou vibratoires dues aux éoliennes, d'autre part en raison des biais importants dans les études publiées par cette unique équipe dans des revues souvent non soumises à comité de lecture. De plus, compte tenu de la non-répétabilité de ces observations par d'autres équipes de recherche, le groupe de travail n'a pas retenu la VAD dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires liés aux émissions sonores des éoliennes.

Le syndrome éolien (WTS), quant à lui, désigne un ensemble de symptômes rapportés par des riverains de parcs éoliens et dont ils attribuent eux-mêmes la cause aux éoliennes. Le WTS ne correspond pas à un mécanisme d'effets particulier. Ces symptômes (troubles du sommeil, maux de tête, acouphènes, troubles de l'équilibre, etc.) ne sont pas spécifiques d'une pathologie. Ils correspondent cependant à un ensemble de manifestations pouvant être consécutives à un stress, à la perte de sommeil et devenir handicapantes pour le sujet qui les ressent. Un stress chronique peut devenir pathogène suite aux dérégulations neuroendocriniennes et hormonales. De plus, l'effet *nocebo*, déclenché par une perception négative d'un évènement, est à l'origine d'un mécanisme neurophysiologique augmentant le stress et les perturbations physiques qui en découlent. Ces symptômes ne sont pas non plus spécifiques à une exposition particulière. Ils sont aussi rapportés par exemple chez les personnes se plaignant d'un environnement bruyant (trafic routier) ou d'une hypersensibilité aux ondes électromagnétiques.

En l'état actuel des connaissances, aucun mécanisme physiologique n'est directement relié à une exposition spécifique générée par les bruits ou les vibrations émis par les éoliennes. Les études expérimentales concernant plus particulièrement les infrasons et basses fréquences sonores sont peu nombreuses et ne soutiennent pas l'hypothèse de l'existence d'un effet. Il est d'ailleurs à noter que généralement, les effets rapportés par les riverains ne sont pas spécifiquement associés aux IBF mais plus largement à la présence d'éoliennes (bruit audible, impact visuel, etc.).

Il est en effet très difficile d'isoler, à l'heure actuelle, les effets sur la santé des IBF de ceux du bruit audible ou d'autres causes potentielles qui pourraient être dues aux éoliennes. Ainsi, les individus souffrant de symptômes rapportent des effets sur leur santé ou des ressentis qu'ils associent aux éoliennes sans toujours pouvoir désigner précisément les agents (infrasons, basses fréquences, modulation d'amplitude de sons audibles, vibrations, etc.) supposés à la source de ces effets (exemple : confusion possible entre infrasons et modulation d'amplitude de sons audibles).

Des pistes sérieuses de mécanismes d'effets *via* le système cochléo-vestibulaire qui restent à confirmer

Les récentes connaissances acquises relatives à la physiologie du système cochléo-vestibulaire ont révélé plusieurs pistes de mécanismes d'effets physiologiques liés à une exposition à des infrasons et basses fréquences sonores. Ce système sensoriel dispose en effet d'une sensibilité particulière aux IBF, supérieure à celle d'autres parties du corps humain.

Les données actuelles permettent d'évoquer l'hypothèse que des sons de fréquences trop basses ou de niveaux trop faibles pour être clairement audibles pourraient avoir des effets médiés par les récepteurs cochléo-vestibulaires. Parmi les mécanismes possibles :

- l'induction de réponses non auditives par les cellules vestibulaires lorsqu'un son de fréquence très basse parvient à la base de la cochlée ;
- une stimulation « non classique » des cellules sensorielles auditives les plus apicales activant des voies cochléaires non auditives ;
- l'induction de déséquilibres ioniques et volumiques dans les liquides de l'oreille interne par la mise en vibration globale et prolongée de la membrane basilaire par un son de fréquence très basse ;
- l'induction de modulations de la réponse des cellules sensorielles auditives à des sons ordinaires par des sons très basse fréquence, inaudibles par eux-mêmes mais affectant l'audition des sons audibles concomitants. Certaines particularités, notamment anatomiques, pourraient prédisposer leurs porteurs à des modulations de plus grande intensité.

Les phénomènes cités ci-dessus ont été observés expérimentalement à l'aide de sons purs assez intenses (par exemple une centaine de dB SPL à 200 Hz chez le petit animal de laboratoire, ce qui n'équivaut pas forcément à un son de très basse fréquence chez l'Homme). Mais l'existence de ces phénomènes pour des expositions sonores se rapprochant de celles des riverains d'éoliennes (sons complexes, de moindre intensité sonore mais de durée prolongée) reste à démontrer.

Le groupe de travail souligne que ces effets physiologiques, souvent évoqués par les associations de riverains de parcs éoliens, ont une signature objective. Par exemple, s'il y a déséquilibre volumique des liquides de l'oreille interne, cela se traduit par des résultats anormaux à des tests ORL, avec une sensibilité et une spécificité élevées. Or, cette signature n'a pour l'instant jamais été recherchée chez les plaignants. L'existence d'un concept plausible ne signifie pas pour autant qu'il soit à l'origine des plaintes des riverains. Ces effets physiologiques se traduisent par ailleurs par des manifestations (vertiges, acouphènes, nausées, etc.), que les personnes savent décrire mais qui sont rarement mentionnés, les divers témoignages recueillis au cours de l'expertise décrivent cependant plus fréquemment d'autres types d'effets, tels que des troubles du sommeil et de l'humeur (dépression, stress, anxiété, etc.). L'exploitation systématique de telles données permettrait de guider les études épidémiologiques pour mieux préparer les questions à poser aux riverains d'éoliennes et mieux orienter la recherche de signes objectifs.

Des études épidémiologiques peu nombreuses et peu concluantes

Des travaux épidémiologiques devraient permettre de confronter les pistes de mécanismes d'effets physiologiques aux états de santé observés dans les populations riveraines. Malheureusement, ces études sont peu nombreuses et elles se sont exclusivement intéressées aux effets du bruit audible des éoliennes sur la santé des riverains. Il n'en existe aucune qui se soit focalisée sur les effets sur la santé des infrasons ou des sons basse fréquence émis dans l'environnement et plus particulièrement produits par les éoliennes.

Toutes ces études sont transversales, ce qui implique qu'elles ne peuvent permettre d'affirmer que la cause recherchée, c'est-à-dire l'exposition au bruit des éoliennes, a bien précédé l'effet étudié. Les résultats observés dans la majorité de ces études restent marqués par des biais de sélection ou de confusion. Une seule étude peut être considérée comme étant de bonne qualité scientifique. C'est aussi la seule à avoir inclus non seulement des mesures subjectives mais aussi des mesures objectives des différents états de santé auxquels elle s'intéresse. Cette étude ne montre pas d'association entre le niveau de bruit audible dû aux éoliennes et les états de santé auto-déclarés par les répondants (qualité de sommeil, vertiges, acouphènes, migraines et maux de tête fréquents, maladies chroniques comme les cardiopathies, l'hypertension et le diabète), le niveau de stress et la qualité de vie perçue. Les mesures objectives des états de santé (concentration de cortisol dans les cheveux, pression artérielle, fréquence cardiaque au repos et qualité de sommeil mesurée) sont cohérentes avec les déclarations des participants. Ces mesures ne sont pas plus associées avec le niveau de bruit audible dû aux éoliennes. En revanche, cette étude montre une association entre ce même niveau de bruit audible et la gêne due à certaines caractéristiques des éoliennes (effet stroboscopique, lumières clignotantes, vibrations, effet visuel).

Le faible nombre d'études réalisées sur cette question et des lacunes dans leur méthodologie sont autant d'éléments incitant à considérer qu'il n'est actuellement pas possible de conclure quant à l'impact du bruit des éoliennes sur la santé.

Des effets déjà mal cernés pour les expositions à des infrasons et basses fréquences sonores de très fortes intensités

Les expositions à des infrasons et basses fréquences sonores de très fortes intensités (de 20 à 40 dB plus élevées que celles des éoliennes, donc mettant en jeu des énergies 100 à 10 000 fois supérieures) sont retrouvées dans le milieu professionnel. Cependant, les documents produits par des organismes nationaux ayant pour mission la sécurité au travail et une visée de recommandation en ce qui concerne des expositions professionnelles, contiennent peu de données étayées. Beaucoup rapportent des effets peu spécifiques (fatigue, troubles psychologiques), qui sont qualifiés d'indéniables ou appréciables mais décrits comme passagers et supportables. Si certains mécanismes extra-auditifs sont invoqués, mais aucunement démontrés, le dogme implicite selon lequel ce qui n'est pas audible ne peut pas avoir d'action physiologique se retrouve à la base des recommandations. La problématique scientifique n'est donc pas élucidée, et les recommandations publiées ne sont aucunement transposables à la présente saisine.

Des connaissances peu stabilisées quant aux effets des expositions prolongées aux infrasons et basses fréquences sonores de plus faibles niveaux sonores

Il existe peu d'études soumises à comité de lecture sur la problématique des effets sanitaires de l'exposition à des basses fréquences sonores. Aucune étude scientifique n'évalue en particulier les effets sur la santé découlant de l'exposition aux seuls sons basses fréquences produits par les éoliennes. Cependant, quelques études ont été réalisées pour d'autres sources de bruit, telles que des bruits de ventilation, de pompes à chaleur ou de compresseurs, des bruits de trafic routier, *etc*, pour des intensités de mêmes niveaux que celles émises par les parcs éoliens. Dans ces études, la gêne autodéclarée (questionnaire) constitue le seul effet sanitaire observé. Aucune association n'a été retrouvée avec un marqueur physiologique pouvant identifier un effet sur la santé. Ces études ont néanmoins permis d'établir qu'il faut un niveau sonore beaucoup plus élevé par rapport aux fréquences plus hautes pour entendre un son basses fréquences.

L'extrapolation de ces résultats au cas des éoliennes doit être faite avec prudence. En effet :

- concernant l'exposition aux ondes sonores aériennes :
    - les durées d'exposition courtes pratiquées dans la plupart de ces études sont peu compatibles avec les expositions continues auquelles sont soumis les riverains d'éoliennes. Or, aucun consensus n'existe quant aux limites acceptables pour une exposition prolongée ;
    - ces études montrent la nécessité d'harmoniser les appareils et les conditions de mesure pour mieux définir le contenu spectral étudié et pour différencier les sons purs des bruits basses fréquences et des infrasons ;
    - elles montrent également la nécessité de modes opératoires plus homogènes pour interpréter des enregistrements tels que les polysomnogrammes ou d'autres méthodes d'imagerie qui permettent une objectivation de la gêne déclarée ;
- concernant les autres types d'exposition :
    - lorsque des vibrations sont responsables d'expositions infrasoniques, il s'agit de vibrations répétitives, transmises par les milieux solidiens (murs et sol), à des intensités plus élevées que celles émises par les éoliennes. La « maladie vibroacoustique » (VAD, § 6.4.1) repose sur des rapports dont les conclusions ne peuvent pas être extrapolées aux effets des IBF émis par les éoliennes ;
    - les stimulations sensorielles environnementales sur l'organisme, sonores et visuelles, infrasonores ou non, sont celles auxquelles se réfère le syndrome éolien (WTS). Elles génèrent un stress dont les conséquences sur le « cerveau hormonal » et l'image mentale sonore demanderaient des études complémentaires.

Un effet *nocebo* constaté

Parallèlement à ces résultats controversés concernant les effets des expositions prolongées aux infrasons et basses fréquences sonores de faibles niveaux, plusieurs études expérimentales, de très bonne qualité scientifique, effectuées en double aveugle et répétées, démontrent l'existence d'effets et de ressentis négatifs chez des personnes pensant être exposées à des infrasons inaudibles alors qu'elles ne le sont pas forcément. Ces effets ou ressentis négatifs seraient causés par les seules attentes d'effets délétères associés à ces expositions.

Cet effet, que l'on peut qualifier de *nocebo*, contribue à expliquer l'existence de symptômes liés au stress chez des riverains de parcs éoliens.

Cet effet nocebo pourrait être d'autant plus important dans un contexte éolien où de multiples arguments d'opposition non exclusivement sanitaires (économiques, culturels, territoriaux, politiques, etc., cf. § 2.4.4) circulent, véhiculés en particulier par Internet et qui créent une situation anxiogène.

Néanmoins, l'existence d'un tel effet *nocebo* n'exclut pas *de facto* l'existence d'autres effets sanitaires pouvant être potentiellement exacerbés par lui.

► Résumé

Trois constats peuvent être effectués quant aux situations qui ont motivé ces travaux :

- des effets sanitaires sont déclarés par des riverains à proximité des éoliennes, que certains (pas tous) attribuent aux infrasons produits par ces éoliennes, sans réel argument de preuve ;
- des situations de réels mal-être sont rencontrées, des effets de santé sont quelques fois constatés médicalement mais pour lesquels la causalité avec l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores produits par les éoliennes ne peut être établie de manière évidente ;
- l'exposition aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes ne constitue qu'une hypothèse d'explication à ces effets, parmi les nombreuses rapportées (bruit audible, visuels, stroboscopiques, champ électromagnétique, etc.).

Ces constats ne sont pas spécifiques aux éoliennes. Ils sont également évoqués dans d'autres domaines comme celui de l'exposition aux ondes électromagnétiques.

L'analyse de la littérature permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- en raison de la faiblesse de ses bases scientifiques, la « maladie vibroacoustique » (VAD) ne permet pas d'expliquer les symptômes rapportés ;
- le syndrome éolien, ou WTS, désigne un regroupement de symptômes non spécifiques. Il ne constitue pas une tentative d'explication (mécanisme d'action) ou un élément de preuve de causalité. Cependant, on peut noter la similitude entre les effets rapportés et ceux provoqués par le stress ;
- des effets exclusivement physiologiques, observés expérimentalement chez l'animal pour des niveaux d'infrasons et basses fréquences sonores élevés, sont plausibles mais restent à démontrer chez l'être humain pour des expositions de l'ordre de celles liées aux éoliennes chez les riverains (exposition de longue durée à de faibles niveaux d'exposition) ;
- à l'heure actuelle, le seul effet observé par les études épidémiologiques est la gêne due au bruit audible des éoliennes. Cet effet n'est pas spécifique au bruit éolien, puisque déjà documenté pour le bruit audible provenant d'autres sources. Aucune étude épidémiologique ne s'est intéressée à ce jour aux effets sur la santé des infrasons et basses fréquences sonores produits par les éoliennes ;
- un effet *nocebo* est mis en évidence mais n'exclut pas l'existence d'autres effets.

7.2 Recommandations du groupe de travail

- **Renforcement et systématisation des connaissances relatives aux expositions des riverains**

Afin de faire progresser les connaissances des expositions aux infrasons et basses fréquences sonores, et compte-tenu de la complexité de leur mesure, le groupe de travail encourage :

- le recours à des méthodes normalisées de mesure des IBF des éoliennes. Les types d'appareils utilisés, le protocole ou la méthodologie à suivre pour réaliser des mesures reproductibles et comparables devront être spécifiés. Le groupe de travail souligne que, compte-tenu de la forte corrélation entre le niveau sonore exprimé en dBA et le niveau des IBF pour les éoliennes, il pourrait également être intéressant d'utiliser des méthodes d'estimation des infrasons et basses fréquences sonores à partir de mesures en dBA ;
- la conception d'un modèle de prévision des expositions aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes.

Afin de permettre la comparabilité entre elles des données d'exposition aux bruits produits par les éoliennes, le groupe de travail recommande :

- de développer une méthode expérimentale de caractérisation de la modulation d'amplitude ;
- concernant le bruit audible, que soit déterminé, comme c'est le cas pour le bruit des transports[86], une méthode de calcul unique de prévision du bruit d'éolienne. Ce modèle devra tenir compte des différents paramètres d'influence, à utiliser pour la réalisation de l'étude d'impact sonore dans le cadre de la demande d'autorisation ICPE.

- **Amélioration des connaissances concernant les relations entre santé et exposition aux infrasons et basses fréquences sonores**

<u>Études cliniques / expérimentales</u>

Considérant les pistes de mécanismes cochléo-vestibulaires d'effets constatés chez l'animal en laboratoire et l'avancée récente des techniques de mesures physiologiques non invasives qui peuvent être effectuées en quelques dizaines de minutes, le groupe de travail recommande la réalisation d'études complémentaires chez l'être humain, à domicile, en utilisant ces techniques.

Les tests déjà validés pour la détection d'une homéostasie anormale des cellules sensorielles cochléaires chez des malades de Menière pourraient donc être utilisés (otoémissions provoquées, otoémissions spontanées, électrocochléographie, vidéonystagmoscopie). Ces tests peuvent tous être pratiqués sur le terrain et répétés sans inconfort. Il est donc concevable de les réaliser chez des sujets, plaignants (individus décrivant des symptômes d'intérêt) ou non, exposés ou non à des sons très basses fréquences en provenance du champ d'éoliennes à proximité duquel ils résident.

La mise en place d'une étude où l'on retrouverait la signature objective d'un effet physiologique chez des plaignants mais pas chez des non-plaignants, et ce, uniquement lorsque le parc éolien serait en fonctionnement, apporterait plusieurs éléments. Ces observations permettraient non seulement la concrétisation d'une piste explicative, mais aussi la possibilité d'identifier des personnes à risque, et celle de déterminer le seuil physique au-dessus duquel un risque spécifique émerge. Finalement, le monitorage des champs d'éoliennes selon le voisinage et selon les conditions d'exploitation en serait amélioré.

[86] NF S 31-133.

Études épidémiologiques

L'observation des états de santé des riverains d'éoliennes, grâce notamment à des études épidémiologiques, apparait comme une piste évidente et complémentaire aux avancées des connaissances attendues sur les mécanismes physiologiques. Réclamée par les associations de riverains, la réalisation de telles études épidémiologiques rencontre néanmoins certaines difficultés d'ordre méthodologique, notamment un problème de puissance statistique en raison du nombre manifestement limité d'individus exposés au bruit audible et inaudible des éoliennes à l'échelle de la France. Compte-tenu de l'investissement conséquent pour réaliser de telles études mais également de la possible pertinence des données qu'elles pourraient générer, le groupe de travail recommande la réalisation préalable d'une étude de faisabilité d'une telle étude épidémiologique.

Études de psychoacoustique

Considérant l'importance de l'effet des sons audibles sur la gêne, compte tenu de lacunes actuelles dans ce domaine, le groupe de travail préconise :

- de réaliser des études complémentaires portant sur la sonie de sons complexes basses fréquences (pas uniquement des sons purs) ;
- de développer pour cela un protocole d'étude permettant de qualifier la variabilité inter-individuelle de la perception, grâce notamment au recrutement des sujets (non limité à des étudiants en bonne santé, réalisation de tests d'audibilité, etc.) ;
- d'améliorer la caractérisation de la gêne liée aux variations temporelles de bruits audibles non stationnaires et aux modulations d'amplitude.

Études en neurosciences

Enfin, compte-tenu des impacts du stress sur la santé et de l'effet *nocebo* mis en évidence, le groupe de travail suggère de favoriser les études en imagerie médicale et la recherche en neurosciences afin d'identifier les facteurs permettant d'éviter cet effet et/ou de le guérir.

► Amélioration du processus d'information des riverains lors de l'implantation des parcs éoliens

Lors de l'implantation d'un parc éolien à proximité d'habitations, le groupe de travail recommande :

- de veiller tout d'abord à transmettre des éléments d'information pertinents relatifs aux projets de parcs éoliens au plus tôt (avant enquête publique) aux riverains concernés. La rédaction d'un guide explicitant les informations à transmettre a minima en amont de l'enquête publique serait souhaitable ;
- d'améliorer la visibilité des enquêtes publiques ;
- d'étendre le périmètre d'information et de consultation à l'ensemble des riverains potentiellement impactés par le projet (en considération des impacts visuels, sonores, etc.) sans le limiter, comme actuellement, aux seules communes porteuses des projets;
- de palier l'accès aux très nombreuses informations contradictoires, anxiogènes ou non, disponibles sur internet, en mettant à disposition du grand public un état des connaissances régulièrement actualisé (site internet dédié par exemple) et en indiquant son existence aux riverains potentiellement concernés, en amont de la discussion d'un projet de parc éolien.

Concernant le nécessaire dialogue entre parties prenantes autour de parcs ou de projets de parcs éoliens, le groupe de travail recommande :

- de favoriser les discussions et négociations en amont des projets de parcs éoliens. En effet, les porteurs de projet demandent d'abord à l'administration le permis de construire en déposant une étude d'impact sur un projet finalisé, et l'enquête publique arrive en fin de processus, minimisant ainsi le poids de cette enquête dans le processus de décision ;

- de mieux définir les interlocuteurs au niveau local et de mieux les impliquer dans le dialogue. En effet, les services de l'État sont souvent considérés comme étant absents alors qu'ils pourraient jouer un rôle régulateur en matière d'affichage des règles de planification et de diffusion de l'information concernant le développement éolien sur un territoire.

▶ **Amélioration de la redistribution des gains économiques**

Le groupe de travail souligne qu'une partie des oppositions aux parcs éoliens pourrait être expliquée par l'injustice environnementale ressentie par les riverains. Cette injustice est définie par une asymétrie entre les impacts négatifs (sonores et/ou visuels) subis localement par certains riverains et la distribution des gains économiques et environnementaux à d'autres. Pour pallier aux effets sanitaires associés à ce ressenti, le groupe de travail recommande de veiller à une redistribution équitable des retombées économiques de ces parcs.

▶ **Contrôle systématique des émissions des parcs éoliens**

Le groupe de travail recommande que la puissance sonore des éoliennes soit systématiquement contrôlée *in situ* (de façon exhaustive, ou par échantillonnage), avant sa mise en service afin de s'assurer que les caractéristiques sonores des éoliennes installées sont conformes à celles spécifiées dans l'étude d'impact.

À l'exemple des pratiques dans le domaine aéroportuaire, le groupe de travail suggère également, dès la mise en service du parc, la mise en place d'un monitorage systématique et continu des niveaux sonores (audibles et dans la gamme des infrasons et basses fréquences) dus au parc, en un ou plusieurs points représentatifs, à la charge de l'exploitant. Une méthode de contrôle simplifiée devra être proposée afin :

- de suivre l'évolution des niveaux sonores par rapport aux valeurs limites réglementaires et, le cas échéant, d'identifier les éventuelles périodes pour lesquelles les valeurs limites réglementaires seraient dépassées et de déterminer leur fréquence de dépassement ;
- de disposer de mesures de bruit à confronter aux journaux de gêne tenus par les riverains gênés et de rechercher les possibles correspondances entre bruit et gêne déclarée.

En cas de dépassements répétés et significatifs des valeurs limites réglementaires, le groupe de travail recommande de définir des critères précis conduisant à des actions restant à déterminer (amendes, arrêt forcé, mise en conformité, etc).

Le groupe de travail préconise également la réalisation d'une campagne de mesure de l'impact sonore éolien à l'aide d'une méthode d'expertise telle que définie par la norme Pr S 31-114 en cours de rédaction. Le groupe de travail insiste sur l'importance de réaliser des mesures en limite de propriété.

Le groupe de travail souligne que ce type de pratique a contribué à une atténuation des tensions existantes autour des plateformes aéroportuaires, car elle permet d'objectiver les expositions et de mieux répondre aux demandes des riverains.

La nomination d'un interlocuteur privilégié, chargé du suivi de ce contrôle systématique des expositions et de la réponse aux sollicitations des riverains devra être envisagée.

▶ **Réglementation**

Actuellement, la réglementation requiert notamment une valeur limite d'exposition au bruit en limite de propriété (70 dBA en journée, 60 dBA la nuit) *a priori* peu adapté aux infrasons et basses fréquences sonores des éoliennes, puisqu'exprimée en dBA.

Cependant, à la distance minimale d'éloignement des éoliennes par rapport aux habitations (500 m actuellement) et considérant la forme particulière des spectres des éoliennes actuellement

en fonctionnement, qui permet d'établir une relation entre niveaux en dBA et dBG pour ces sources sonores, le groupe de travail considère que les valeurs limites exprimées en dBA peuvent déjà garantir des expositions des riverains (en façade des habitations) aux infrasons et basses fréquences sonores inférieures au seuil d'audibilité communément admis (85 dBG).

Le respect de ces valeurs limites doit donc permettre de prémunir les riverains de toute nuisance potentielle liée à l'audibilité des composantes basses et très basses fréquences du bruit éolien. En revanche, ces valeurs limites ne permettent pas de protéger les riverains d'éventuels effets associés à des infrasons et basses fréquences sonores non audibles, dont l'existence reste cependant encore à démontrer.

Enfin, pour réduire les expositions sonores des riverains des parcs éoliens les plus anciens et compte-tenu des performances acoustiques des turbines les plus récentes, le groupe de travail recommande de faciliter le remplacement d'anciennes éoliennes par de nouvelles (« *repowering* ») en simplifiant le processus administratif associé.

8 Bibliographie

8.1 Publications

Aitken, Mhairi. 2010. "Why we still don't understand the social aspects of wind power: A critique of key assumptions within the literature." *Energy Policy* 38 (4):1834-1841.

Alford, B. R., J. F. Jerger, A. C. Coats, J. Billingham, B. O. French, et R. O. McBrayer. 1966. "Human tolerance to low frequency sound." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 8.

Ambrose, Stephen E., Robert W. Rand, et Carmen M. E. Krogh. 2012. "Wind turbine acoustic investigation infrasound and low-frequency noise—a case study." *Bulletin of Science, Technology & Society* 32 (2):128-141.

Anses. 2013. Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental

Arce, C., D. Ragni, S. Pröbsting, et J. Madsen. 2015. "Impact on flow topology of solid and permeable trailing edge serrations at incidence on cambered and symmetric airfoils." Wind turbine noise, Glasgow.

Arra, Ian, Hazel Lynn, Kimberley Barker, Chiebere Ogbuneke, et Sophie Regalado. 2014. "Systematic Review 2013: Association between Wind Turbines and Human Distress."

Attenborough, Keith, Kai Ming Li, et Kirill Horoshenkov. 2006. *Predicting outdoor sound*. Traduit par. Edité: CRC Press.

Aures, Wilhelm. 1985. "Ein berechnungsverfahren der rauhigkeit." *Acta Acustica united with Acustica* 58 (5):268-281.

Avan, Paul, Fabrice Giraudet, Bertrand Chauveau, Laurent Gilain, et Thierry Mom. 2011. "Unstable distortion-product otoacoustic emission phase in Menière's disease." *Hearing Research* 277 (1):88-95.

Babisch, Wolfgang, Göran Pershagen, Jenny Selander, Danny Houthuijs, Oscar Breugelmans, Ennio Cadum, Federica Vigna-Taglianti, Klea Katsouyanni, Alexandros S. Haralabidis, Konstantina Dimakopoulou, Panayota Sourtzi, Sarah Floud, et Anna L. Hansell. 2013. "Noise annoyance--a modifier of the association between noise level and cardiovascular health?" *The Science of the Total Environment* 452-453:50-57. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.02.034.

Bakker, R.H., E. Pedersen, G.P. van den Berg, R.E. Stewart, W. Lok, et J. Bouma. 2012. "Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress." *Science of The Total Environment* 425:42-51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.005.

Baliatsas, Christos, Irene van Kamp, et Ric van Pol. 2015. "Low frequency noise in relation to health effects: A systematic review."

Baqtasch, Mark, Jeroen Van Dam, Bo Sndergaard, et Anthony Rogers. 2006. "Wind turbine noise-An overview." *Canadian Acoustics* 34 (2):7-15.

Barrière, N. . 1999. "Théorique et Expérimentale de la propagation du bruit de trafic en forêt." Lyon.

Béland, Yves. 2002. "Canadian community health survey–methodological overview." *Health reports* 13 (3):9.

Bell, Derek, Tim Gray, et Claire Haggett. 2005. "The 'social gap'in wind farm siting decisions: explanations and policy responses." *Environmental politics* 14 (4):460-477.

Benedetti, Fabrizio. 2013. "Placebo and the new physiology of the doctor-patient relationship." *Physiological reviews* 93 (3):1207-1246.

Benedetti, Fabrizio, et Martina Amanzio. 2013. "Mechanisms of the placebo response." *Pulmonary pharmacology & therapeutics* 26 (5):520-523.

Benedetti, Fabrizio, Elisa Carlino, et Antonella Pollo. 2011. "How placebos change the patient's brain." *Neuropsychopharmacology* 36 (1):339-354.

Bengtsson, Johanna, Kerstin Persson Waye, et Anders Kjellberg. 2004. "Sound Characteristics in Low Frequency Noise and their Relevance for the Perception of Pleasantness." *Acta Acustica united with Acustica* 90:171-180.

Berger, Robert G., Payam Ashtiani, Christopher A. Ollson, Melissa Whitfield Aslund, Lindsay C. McCallum, Geoff Leventhall, et Loren D. Knopper. 2015. "Health-based audible noise guidelines account for infrasound and low-frequency noise produced by wind turbines." *Frontiers in Public Health* 3.

Berglund, Birgitta, Peter Hassmen, et R. F. Soames Job. 1996. "Sources and effects of low-frequency noise." *The Journal of the Acoustical Society of America* 99:2985-3002. doi: 10.1121/1.414863.

Bian, Lin. 2008. "Effects of low-frequency biasing on spontaneous otoacoustic emissions: frequency modulation." *The Journal of the Acoustical Society of America* 124 (5):3009-3021.

Bian, Lin, et Kelly L. Watts. 2008. "Effects of low-frequency biasing on spontaneous otoacoustic emissions: amplitude modulation." *The Journal of the Acoustical Society of America* 123 (2):887-898.

Birnie, S.E., S. E. Birnie, F. L. Hall, et S. M. Taylor. 1983. "The effects of infrasound on human health." *Canadian Acoustics* 11:46-55.

Bland, C. J., L. N. Meurer, et G. Maldonado. 1995. "A systematic approach to conducting a non-statistical meta-analysis of research literature." *Academic Medicine: Journal of the Association of American Medical Colleges* 70 (7):642-653.

Bolin, Karl. 2009. "Wind Turbine Noise and Natural Sounds: Masking, Propagation and Modeling."

Bolin, Karl, Martin Almgren, Esbjörn Ohlsson, et Ilkka Karasalo. 2014. "Long term estimations of low frequency noise levels over water from an off-shore wind farm." *The Journal of the Acoustical Society of America* 135:1106-1114. doi: 10.1121/1.4863302.

Botha, Paul. 2013. "Ground Vibration, Infrasound and Low Frequency Noise Measurements from a Modern Wind Turbine." *Acta Acustica united with Acustica* 99:537-544. doi: 10.3813/AAA.918633.

Bowdler, R., et G. Leventhall. 2012. *Wind Turbine Noise*. Traduit par. Edité: Multi-Science Publishing Co Ltd.

Broner, N. 2010. "A simple criterion for low frequency noise emission assessment." *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 29 (1):1-13.

Broner, Norman. 1978. "The effects of low frequency noise on people—A review." *Journal of Sound and Vibration* 58 (4):483-500.

BVA/Ademe. 2008. Les français et l'énergie éolienne.

Castelo Branco, Nuno A.A., José Reis Ferreira, et Mariana Alves-Pereira. 2007. "Respiratory pathology in vibroacoustic disease: 25 years of research." *Revista Portuguesa de Pneumologia (English Edition)* 13:129-135. doi: 10.1016/S2173-5115(07)70326-3.

Changeux, Jean-Pierre. 2012. *L'homme neuronal*. Traduit par. Edité. Paris: Fayard/Pluriel.

Chapman, Simon. 2011. "Wind farms and health: who is fomenting community anxieties?" *The Medical Journal of Australia* 195 (9):495.

Chapman, Simon. 2012. "The sickening truth about wind farm syndrome." *New Scientist* 216:26-27. doi: 10.1016/S0262-4079(12)62563-9.

Chapman, Simon, et Alexis St George. 2006. "A disease in search of a cause: a study of self-citation and press release pronouncement in the factoid of wind farms causing "vibroacoustic disease".".

Chapman, Simon, et Alexis St George. 2013. "How the factoid of wind turbines causing 'vibroacoustic disease' came to be 'irrefutably demonstrated'." *Australian and New Zealand Journal of Public Health* 37:244-249. doi: 10.1111/1753-6405.12066.

Chateauraynaud, Francis. 2011. *Argumenter dans un champ de forces : Essai de balistique sociologique*. Traduit par. Edité: Editions Pétra.

Chatillon, Jacques. 2006. "Limites d'exposition aux infrasons et aux ultrasons–Etude bibliographique." *Hygiene et Securite du Travail, Cahiers de Notes Documentaires, INRS* 2:367-374.

Chatillon, Jacques. 2011. "Perception des infrasons." *Acoustique et Techniques* (67):4-10.

Chen, Hsuan-hsiu Annie, et Peter Narins. 2012. "Wind Turbines and Ghost Stories: The Effects of Infrasound on the Human Auditory System." *Acoustics Today* 8:51-56. doi: 10.1121/1.4729580.

Cheng, Haoran, Bing Wang, Chi Tang, Guodong Feng, Chen Zhang, Ling Li, Tian Lin, Fang Du, Hong Duan, Ming Shi, et Gang Zhao. 2012. "Infrasonic noise induces axonal degeneration of cultured neurons via a Ca2+ influx pathway." *Toxicology Letters* 212:190-197. doi: 10.1016/j.toxlet.2012.05.015.

Chong, T. P., P. F. Joseph, et M. Gruber. 2013. "Airfoil self noise reduction by non-flat plate type trailing edge serrations." *Applied Acoustics* 74 (4):607-613.

Chong, Tze Pei, et Alexandros Vathylakis. 2015. "On the aeroacoustic and flow structures developed on a flat plate with a serrated sawtooth trailing edge." *Journal of Sound and Vibration* 354:65-90.

Christidis, Tanya, Claire Paller, Shannon Majowicz, Phil Bigelow, Ashley Wilson, et Sehar Jamal. 2014. "Creating and testing a survey to assess the impact of renewable energy technologies on quality of life." *Environmental Health Review* 56 (04):103-111.

Cohen, Sheldon, Tom Kamarck, et Robin Mermelstein. 1983. "A global measure of perceived stress." *Journal of health and social behavior*:385-396.

Colby, D., R. Dobie, G. Leventhall, D. M. Lipscomb, R. J. McCunney, M. T. Seilo, et B. Sondergaard. 2009. "Wind turbine sound and health effects : an expert panel review."

Cotté, Benjamin, et Shi-Xiu Tian. 2016. "Couplage d'un modèle de source aéroacoustique et d'un code d'équation parabolique pour la propagation du bruit des éoliennes à grande distance." Congrès Français d'Acoustique, Le Mans.

Crichton, Fiona, George Dodd, Gian Schmid, Greg Gamble, Tim Cundy, et Keith J. Petrie. 2014. "The power of positive and negative expectations to influence reported symptoms and mood during exposure to wind farm sound." *Health Psychology: Official Journal of the Division of Health Psychology, American Psychological Association* 33:1588-1592. doi: 10.1037/hea0000037.

Crichton, Fiona, George Dodd, Gian Schmid, Greg Gamble, et Keith J Petrie. 2014. "Can Expectations Produce Symptoms From Infrasound Associated With Wind Turbines?" *Health Psychology: Official Journal of the Division of Health Psychology, American Psychological Association*. doi: 10.1037/a0031760.

Crichton, Fiona, et Keith J. Petrie. 2015. "Health complaints and wind turbines: The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting." *Environmental Research* 140:449–455.

Dallos, Peter. 1986. "Neurobiology of cochlear inner and outer hair cells: intracellular recordings." *Hearing Research* 22 (1):185-198.

Danielsson, AAKE, et ULF Landstrom. 1985. "Blood pressure changes in man during infrasonic exposure." *Acta Medica Scandinavica* 217:531-535.

Davies, Evan. 2003. "27 - Noise and vibration." In *Plant Engineer's Reference Book (Second Edition)*, edité par Eur Ing CEng, MIMechE, HonFSOE, HonFIPlantE et MIMechE HonFIIPE Dennis A. SnowA2 - Eur Ing CEng, 1-16. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Doolan, Con. 2013. "A review of wind turbine noise perception, annoyance and low frequency emission." *Wind Engineering* 37 (1):97-104.

Ecotière, David. 2012. "Estimation of uncertainties due to the wind-induced noise in a screened microphone." Acoustics 2012, Nantes, 2012.

Ecotière, David. 2015. "Can we really predict wind turbine noise with only one point source?, ." Wind Turbine Noise Conference, Glasgow.

Edge, P.M., et W.H. Mayes. 1966. Description of Langley low-frequency noise facility and study of human response to noise frequencies below 50 cps. Hampton, VA, USA: NASA, Langley Research Center; Hampton, VA, United States

Elias, P, N Taillefer, M Villot, et N Weiss. 2007. Protection contre les vibrations environnementales : le cas français In *Etude CSTB pour le MEDDTL*.

Ellermeier, W., M. Eigenstetter, et K. Zimmer. 2001. "Psychoacoustic correlates of individual noise sensitivity." *The Journal of the Acoustical Society of America* 109 (4):1464-1473.

Ellis, Geraint. 2015. *'Understanding the drivers of the social acceptance of wind energy projects'*.

Ellis, Geraint, et John Barry. 2006. Renewable energy and discourses of objection: towards deliberative policy-making. Belfast: Queen's University Belfast.

Ellis, Geraint, S. Huber, et R. Horbarty. 2013. "Community Acceptance of Wind Energy Projects." *EDI Quarterly* 5 (1):18-23.

ETSU-R-97. 1996. The assessment and rating of noise from wind farms

EurObserv'ER. 2016. Baromètre éolien.

Evans, T., J. Cooper, et V. Lenchine. 2013. Infrasound levels near windfarms and in other environments. Adelaide, South Australia: Environment Protection Authority.

Feder, Katya, David S. Michaud, Stephen E. Keith, Sonia A. Voicescu, Leonora Marro, John Than, Mireille Guay, Allison Denning, Tara J. Bower, Eric Lavigne, et others. 2015. "An assessment of quality of life using

the WHOQOL-BREF among participants living in the vicinity of wind turbines." *Environmental Research* 142:227-238.

FEE-BearingPoint. 2015. Observatoire de l'éolien - Analyse du marché, des emplois et du futur de l'éolien en France.

Fégeant, Olivier. 2001. *Noise from wind turbines*. Traduit par. Edité. Stockholm: Institutionen för byggnader och installationer.

Findeis, H., E. Peters, et others. 2004. "Disturbing effects of low frequency sound immissions and vibrations in residential buildings." *Noise and Health* 6.

Fischhoff, Baruch. 1995. "Risk perception and communication unplugged: twenty years of process." *Risk analysis* 15 (2):137-145.

Fletcher, Harvey, et W. A. Munson. 1933. "Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation*." *Bell System Technical Journal* 12 (4):377-430. doi: 10.1002/j.1538-7305.1933.tb00403.x.

Fonseca, J., J. Martins dos Santos, P. Oliveira, N. Laranjeira, et N. A. A. Castelo Branco. 2012. "Noise-induced duodenal lesions: A light and electron microscopy study of the lesions of the rat duodenal mucosa exposed to low frequency noise." *Clinics and Research in Hepatology and Gastroenterology* 36:72-77. doi: 10.1016/j.clinre.2011.10.002.

Fowler, K., E. Koppen, et K. Matthis. 2013. "International Legislation and Regulations for Wind Turbine Noise " 5th International Conference on Wind Turbine Noise Denver.

Fuchs, Guillermo Luis, Ana Maria Verzini, et Horacio Nitardi. 1995. "Preliminary search of thresholds and effects of very low frequency sounds on man." *International journal of environmental studies* 49:1-11.

Gauvreau, Benoît, David Ecotière, H. Lefevre, et B. Bonhomme. 2009. "Propagation acoustique en milieu extérieur complexe: Caractérisation expérimentale in-situ des conditions micrométéorologiques: Eléments méthodologiques et métrologiques."

Gerenton, Grégory, Fabrice Giraudet, Idir Djennaoui, Yoann Pavier, Laurent Gilain, Thierry Mom, et Paul Avan. 2015. "Abnormal fast fluctuations of electrocochleography and otoacoustic emissions in Menière's disease." *Hearing Research* 327:199-208.

Gibbons, Stephen. 2015. "Gone with the wind: Valuing the visual impacts of wind turbines through house prices." *Journal of Environmental Economics and Management* 72:177-196.

Goujard, Bertrand. 2002. "Les infrasons entre science et mythe : la bibliométrie peut-elle contribuer à clarifier une vérité scientifique controversée ?", Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels (EIGSI) Université de la Rochelle.

Guillaume, Gwenaël, Judicaël Picaut, Guillaume Dutilleux, et Benoît Gauvreau. 2011. "Time-domain impedance formulation for transmission line matrix modelling of outdoor sound propagation." *Journal of Sound and Vibration* 330 (26):6467-6481.

Gutmann, R., B. Wollenberg, B. Krampert, et K. Mees. 1993. "[Incidence of Doppler ultrasound detectable stenoses of cervical arteries in patients with cochlear-vestibular symptoms]." *Laryngo-rhino-otologie* 72 (10):502-505.

Hansen, Kristy L., Colin H. Hansen, et Branko Zajamšek. 2015. "Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences." *Building and Environment* 94:764-772.

Harrison, Robert V. 2014. "On the biological plausibility of Wind Turbine Syndrome." *International Journal of Environmental Health Research* 0:1-6. doi: 10.1080/09603123.2014.963034.

He, Mu, André Leickel, et Detlef Krahé. 2015. "The visual effect combined with audible noise of wind turbine and its related EEG reaction."

HealthCanada. 2010. Health Canada Noise Impact Assessment Guidance for Environmental Assessments, final draft. édité par Environmental Assessment Division. Ottawa.

Heintzelman, Martin D., et Carrie M. Tuttle. 2012. "Values in the wind: a hedonic analysis of wind power facilities." *Land Economics* 88 (3):571-588.

Horonjeff, Richard D., et Jason C. Ross. 2002. "Overcoming instrument noise floors when measuring in quiet environments." 2002.

Huber, S., et R Horbaty. 2010. State-of-the-art report édité par Social Acceptance of Wind Energy Projects. Wind Task 28: International Energy Agency.

Hurault, J., A. Gupta, E. Sloth, N.C. Nielsen, A. Borgoltz, et P. Ravetta. 2015. "Aeroacoustic wind tunnel experiment for serration design optimisation and its application to a wind turbine rotor." Wind turbine noise, Glasgow.

Inagaki, T., Y. Li, et Y. Nishi. 2014. "Analysis of aerodynamic sound noise generated by a large-scaled wind turbine and its physiological evaluation." *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi: 10.1007/s13762-014-0581-4.

Jabben, Jan, et Edwin Verheijen. 2012. "Options for assessment and regulation of low frequency noise." *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 31 (4):225-238.

Jakovljevic, Miro. 2014. "The placebo–nocebo response: Controversies and challenges from clinical and research perspective." *European Neuropsychopharmacology* 24 (3):333-341.

Janssen, Sabine A., Henk Vos, Arno R. Eisses, et Eja Pedersen. 2011. "A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources." *The Journal of the Acoustical Society of America* 130 (6):3746-3753.

Jastreboff, Pawel J., et Margaret M. Jastreboff. 2004. "Decreased sound tolerance." *Tinnitus: Theory and management*:8-15.

Jauchem, James R., et Michael C. Cook. 2007. "High-Intensity Acoustics for Military Nonlethal Applications - A Lack of Useful Systems." *Military Medicine* 172:182-189.

Jobert, Arthur, Pia Laborgne, et Solveig Mimler. 2007. "Local acceptance of wind energy: Factors of success identified in French and German case studies." *Energy Policy* 35 (5):2751-2760. doi: 10.1016/j.enpol.2006.12.005.

Kahneman, Daniel, et Amos Tversky. 1979. "Prospect theory: An analysis of decision under risk." *Econometrica: Journal of the econometric society*:263-291.

Kåsin, Jan Ivar, John Kjekshus, Pål Aukrust, Tom Eirik Mollnes, et Anthony Wagstaff. 2009. "A helicopter flight does not induce significant changes in systemic biomarker profiles." *Scandinavian Journal of Clinical & Laboratory Investigation* 69:462-474. doi: 10.1080/00365510902745360.

Kåsin, Jan Ivar, Tor Ole Kjellevand, John Kjekshus, Geir B. Nesheim, et Anthony Wagstaff. 2012. "CT Examination of the Pericardium and Lungs in Helicopter Pilots Exposed to Vibration and Noise." *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 83:858-864. doi: 10.3357/ASEM.3209.2012.

Kasprzak, C. 2010. "The Influence of Infrasounds on the Electrocardiograph Patterns in Humans." *Acta Physica Polonica A* 118:87-90.

Kasprzak, C. 2014. "The Influence of Infrasound Noise from Wind Turbines on EEG Signal Patterns in Humans." *Acta Physica Polonica, A.* 125.

Kasprzak, Cezary. 2014. "The influence of infrasounds on the Sensory Motor Rhythm (SMR) of EEG Signal."

Knopper, Loren D., Christopher A. Ollson, Lindsay C. McCallum, Melissa L. Whitfield Aslund, Robert G. Berger, Kathleen Souweine, et Mary McDaniel. 2014. "Wind turbines and human health." *Frontiers in Public Health* 2. doi: 10.3389/fpubh.2014.00063.

Kragh, J., B. Plosving, SA. Storeheier, G. Taraldsen, et HG Jonasson. 2002. Nordic environmental noise prediction method, Nord2000 summary report. General Nordic sound propagation model and applications in source-related prediction methods.: DELTA Acoustics and Vibration Report.

Krogh, Carmen M. E. 2011. "Industrial Wind Turbine Development and Loss of Social Justice?" *Bulletin of Science, Technology & Society* 31:321-333. doi: 10.1177/0270467611412550.

Kugler, Kathrin, Lutz Wiegrebe, Benedikt Grothe, Manfred Kössl, Robert Gürkov, Eike Krause, et Markus Drexl. 2014. "Low-frequency sound affects active micromechanics in the human inner ear." *Royal Society Open Science* 1. doi: 10.1098/rsos.140166.

Kurth, Florian, Karl Zilles, Peter T. Fox, Angela R. Laird, et Simon B. Eickhoff. 2010. "A link between the systems: functional differentiation and integration within the human insula revealed by meta-analysis." *Brain Structure and Function* 214 (5-6):519-534.

Labussiere, Olivier, et Alain Nadai. 2014. "Unexpected Wind Power 'Potentials': The Art of Planning with Inherited Socio-Geographical Configurations (France)." *Scottish Geographical Journal* 130 (3):152-167. doi: 10.1080/14702541.2014.922210.

Landstrom, U., S. L. Haggqvist, et P. Lofstedt. 1988. "Low frequency noise in lorries and correlated effects on drivers." *Journal of low frequency noise & vibration* 7:104-109.

Lang, Corey, James J. Opaluch, et George Sfinarolakis. 2014. "The windy city: Property value impacts of wind turbines in an urban setting." *Energy Economics* 44:413-421.

Leventhall, Geoff. 2009. "Review: Low Frequency Noise. What we know, what we do not know, and what we would like to know." *Noise Notes* 8:3-28. doi: 10.1260/1475-4738.8.4.3.

Leventhall, Geoff. 2013. "Concerns about Infrasound from Wind Turbines." *Acoustics Today* 9:30-38. doi: 10.1121/1.4821143.

Leventhall, Geoff, Peter Pelmear, et Stephen Benton. 2003. "A review of published research on low frequency noise and its effects."

Li, Zheng-Guang, Guo-Qing Di, et Li Jia. 2014. "Relationship between Electroencephalogram variation and subjective annoyance under noise exposure." *Applied Acoustics* 75:37-42. doi: 10.1016/j.apacoust.2013.06.011.

Liu, Chang, Elisabeth Glowatzki, et Paul Albert Fuchs. 2015. "Unmyelinated type II afferent neurons report cochlear damage." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (47):14723-14727.

LUBW. 2016. Low-frequency noise incl. infrasound from wind turbines and other sources.

Magari, ShannonR, AnnetteC Rohr, ClintonE Smith, et Martin Schiff. 2014. "Evaluation of community response to wind turbine-related noise in Western New York State." *Noise and Health* 16. doi: 10.4103/1463-1741.137060.

Makarewicz, Rufin. 2011. "Is a wind turbine a point source?" *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (2):579-581.

Makarewicz, Rufin. 2016. "Cylindrical spreading of noise from a wind turbine." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 148:1-5.

Marsh, K. J. 1982. "The CONCAWE model for calculating the propagation of noise from open-air industrial plants." *Applied Acoustics* 15 (6):411-428.

Masutani, Haruhiko, Haruo Takahashi, Isamu Sando, et Hiroaki Sato. 1991. "Vestibular aqueduct in Meniere's disease and non-Meniere's disease with endolymphatic hydrops: a computer aided volumetric study." *Auris Nasus Larynx* 18 (4):351-357.

McCunney, Robert J., Kenneth A. Mundt, W. David Colby, Robert Dobie, Kenneth Kaliski, et Mark Blais. 2014. "Wind Turbines and Health: A Critical Review of the Scientific Literature." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 56:e108-e130. doi: 10.1097/JOM.0000000000000313.

McGuire, Sarah. 2008. An overview of methods to quantify annoyance due to noise with application to tire-road noise. Herrick Laboratories

MG_Acoustics. 2012. Summary of wind turbine noise propagation below 100Hz.

MG_Acoustics. 2014a. Analysis, Modeling, and Prediction of Infrasound and Low Frequency Noise from Wind Turbine Installation Phase 2: Southern Ontario Site Final report. Ottawa, Ontario.

MG_Acoustics. 2014b. Analysis, Modeling, and Prediction of Infrasound and Low Frequency Noise from

Wind Turbine Installation Phase 1: PEI Site Final report. Ottawa, Ontario.

Michaud, David S., Katya Feder, Stephen E. Keith, Sonia A. Voicescu, Leonora Marro, John Than, Mireille Guay, Allison Denning, Tara Bower, Eric Lavigne, et others. 2016. "Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects." *The Journal of the Acoustical Society of America* 139 (3):1443-1454.

Michaud, David S., Katya Feder, Stephen E. Keith, Sonia A. Voicescu, Leonora Marro, John Than, Mireille Guay, Allison Denning, Tara Bower, Paul J. Villeneuve, et others. 2016. "Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise." *The Journal of the Acoustical Society of America* 139 (3):1467-1479.

Michaud, David S., Katya Feder, Stephen E. Keith, Sonia A. Voicescu, Leonora Marro, John Than, Mireille Guay, Allison Denning, Brian J. Murray, Shelly K. Weiss, Paul J. Villeneuve, Frits van den Berg, et Tara Bower. 2016. "Effects of Wind Turbine Noise on Self-Reported and Objective Measures of Sleep." *SLEEP* 39 (01):97-109. doi: 10.5665/sleep.5326.

Michaud, David S., Stephen E. Keith, Katya Feder, Sonia A. Voicescu, Leonora Marro, John Than, Mireille Guay, Tara Bower, Allison Denning, Eric Lavigne, et others. 2016. "Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance." *The Journal of the Acoustical Society of America* 139 (3):1455-1466.

Mikolajczak, J., S. Borowski, J. Marć-Pieńkowska, G. Odrowaz-Sypniewska, Z. Bernacki, J. Siódmiak, et P. Szterk. 2013. "Preliminary studies on the reaction of growing geese (Anser anser f. domestica) to the proximity of wind turbines." *Polish Journal of Veterinary Sciences* 16:679-686.

Moller, H. 1984. "Physiological and psychological effects of infrasound on humans." *Journal of low frequency noise & vibration* 3:1-17.

Moller, H., et C. Sejer Pedersen. 2004. "Hearing at low and infrasonic frequencies." *Noise and Health* 6 (23):37.

Møller, Henrik, et Morten Lydolf. 2002. "A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise." *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 21:53-63. doi: 10.1260/026309202761019507.

Møller, Henrik, et Christian Sejer Pedersen. 2011. "Low-frequency noise from large wind turbines." *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (6):3727-3744.

Moorhouse, A., D. Waddington, et M. Adams. 2005. Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance

Moorhouse, Andy T, David C Waddington, et Mags D Adams. 2009. "A procedure for the assessment of low frequency noise complaints." *The Journal of the Acoustical Society of America* 126:1131-1141. doi: 10.1121/1.3180695.

Mroczek, Bożena, Donata Kurpas, et Beata Karakiewicz. 2012. "Influence of distances between places of residence and wind farms on the quality of life in nearby areas." *Annals of agricultural and environmental medicine: AAEM* 19:692-696.

Nadaï, Alain, et Olivier Labussière. 2009. "Wind power planning in France (Aveyron), from state regulation to local planning." *Land Use Policy* 26 (3):744-754. doi: 10.1016/j.landusepol.2008.10.018.

Nadaï, Alain, et Olivier Labussière. 2010. "Acceptabilité sociale et planification territoriale, éléments de réflexion à partir de l'éolien et du stockage du CO2." *Captage et stockage du CO2 Enjeux techniques et sociaux en France*:45-60.

Nadaï, Alain, et Dan van der Horst. 2010. "Wind power planning, landscapes and publics." *Land Use Policy* 27 (2):181-184. doi: 10.1016/j.landusepol.2009.09.009.

Nakamura, N., et Y. Inukai. 1998. "Proposal of models which indicate unpleasantness of low frequency noise using exploratory factor analysis and structural covariance analysis." *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 17:127-131.

NewSouthWales-Government. 2011. Draft Planning Guidelines Wind Farms (Annexe B : Wind Farm Noise Guidelines) édité par NSW Government Planning and Infrastructure.

Nilsson, Mats, Jörgen Bengtsson, et Ronny Kl\a eboe. 2014. *Environmental methods for transport noise reduction*. Traduit par. Edité: CRC Press.

Nissenbaum, Michael A., Jeffery J. Aramini, Christopher D. Hanning, et others. 2012. "Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health." *Noise and Health* 14.

NSG. 1999. Richtlijn laagfrequent geluid Nederlandes Stichting Geluidhinder

Observ'ER. 2015. Baromètre des énergies renouvelables électriques en France.

Oerlemans, S., P. Sijtsma, et B. Méndez López. 2007. "Location and quantification of noise sources on a wind turbine." *Journal of Sound and Vibration* 299 (4–5):869-883. doi: 10.1016/j.jsv.2006.07.032.

Oerlemans, Stefan. 2009. "Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines." Universiteit Twente, Google Scholar.

OFEN-OFEV-ARE. 2010. Recommandations pour la planification d'installations éoliennes.

Okada, Akira, et Ryoichi Inaba. 1990. "Comparative study of the effects of infrasound and low-frequency sound with those of audible sound on sleep." *Environment International* 16 (4-6):483-490.

Oliva, David, Valtteri Hongisto, Jukka Keränen, et Vesa Koskinen. 2011. "Measurement of low frequency noise in rooms." *Indoor Environment Laboratory, Turku, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland*.

Oliveira, Pedro, José Brito, João Mendes, Jorge da Fonseca, Artur Águas, et José Martins dos Santos. 2013. "Effects of large pressure amplitude low frequency noise in the parotid gland perivasculo-ductal connective tissue."

OMS. 1986. "WHO - The Ottawa Charter for Health Promotion " WHO - The Ottawa Charter for Health Promotion Ottawa

OMS. 2009. Night noise guidelines for Europe. Copenhagen, Denmark: OMS.

Onakpoya, Igho J., Jack O'Sullivan, Matthew J. Thompson, et Carl J. Heneghan. 2015. "The effect of wind turbine noise on sleep and quality of life: A systematic review and meta-analysis of observational studies." *Environment International* 82:1-9. doi: 10.1016/j.envint.2015.04.014.

Ontario_Ministry_of_Environment. 2009. Proposed Content for the Renewable Energy Approval Regulation under the Environmental Protection Act. Toronto.

Paller, Claire. 2014. "Exploring the Association between Proximity to Industrial Wind Turbines and Self-Reported Health Outcomes in Ontario, Canada."

Palmer, William KG. 2011. "Learning from evidence of sound experienced from wind turbines." *Canadian Acoustics* 39:88-89.

Parent, Jean-Philippe. 2007. "L'effet des éoliennes sur le bétail et les autres animaux." *Université Laval, Québec, Québec*.

Patuzzi, Robert. 2011. "Ion flow in cochlear hair cells and the regulation of hearing sensitivity." *Hearing Research* 280 (1):3-20.

Pawlaczyk-Luszczyńska, Ma Lgorzata, Adam Dudarewicz, Ma Lgorzata Waszkowska, et Mariola Śliwińska-kowalska. 2003. "Assessment of annoyance from low frequency and broadband noise." *Int J Occup Environ Med* 16:337-43.

Pawlaczyk-Luszczynska, Malgorzata, Adam Dudarewicz, Wieslaw Szymczak, et Mariola Sliwinska-Kowalska. 2010. "Evaluation of annoyance from low frequency noise under laboratory conditions." *Noise & Health* 12:166-181. doi: 10.4103/1463-1741.64974.

Pawlaczyk-Łuszczyńska, Małgorzata, Adam Dudarewicz, Kamil Zaborowski, Małgorzata Zamojska-Daniszewska, et Małgorzata Waszkowska. 2014. "Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: A pilot study." *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 27:364-388. doi: 10.2478/s13382-014-0252-1.

Pedersen, Eja. 2011. "Health aspects associated with wind turbine noise - Results from three field studies." *Noise Control Engineering Journal* 59 (1):47-53. doi: 10.3397/1.3533898.

Pedersen, Eja, LR-M. Hallberg, et K. Persson Waye. 2007. "Living in the vicinity of wind turbines—a grounded theory study." *Qualitative Research in Psychology* 4:49–63.

Pedersen, Eja, et Kerstin Persson Waye. 2007. "Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments." *Occupational and Environmental Medicine* 64 (7):480-486. doi: 10.1136/oem.2006.031039.

Pedersen, Eja, et Kerstin Persson Waye. 2004. "Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship." *The Journal of the Acoustical Society of America* 116 (6):3460-3470.

Pedersen, Eja, et Frits van den Berg. 2010. "Why is wind turbine noise poorly masked by road traffic noise?", 2010.

Pedersen, Eja, Frits van den Berg, Roel Bakker, et Jelte Bouma. 2009. "Response to noise from modern wind farms in The Netherlands." *The Journal of the Acoustical Society of America* 126 (2):634-643.

Pedersen, Eja, Frits van den Berg, Roel Bakker, et Jelte Bouma. 2010. "Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound." *Energy Policy* 38:2520-2527. doi: 10.1016/j.enpol.2010.01.001.

Pedersen, Eja, et Kerstin Persson Waye. 2007. "Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments." *Occupational and Environmental Medicine* 64 (7):480-486. doi: 10.1136/oem.2006.031039.

Persinger, Michael A. 2014. "Infrasound, human health, and adaptation: an integrative overview of recondite hazards in a complex environment." *Natural Hazards* 70:501-525. doi: 10.1007/s11069-013-0827-3.

Persson, K., et M. Björkman. 1988. "Annoyance due to low frequency noise and the use of the dB(A) scale." *Journal of Sound and Vibration* 127 (3):491-497.

Persson Waye, K., A. Agge, A. Clow, et F. Hucklebridge. 2004. "Cortisol response and subjective sleep disturbance after low-frequency noise exposure." *Journal of Sound and Vibration* 277:453-457. doi: 10.1016/j.jsv.2004.03.004.

Persson Waye, K., J. Bengtsson, A. Agge, et M. Björkman. 2003. "A descriptive cross-sectional study of annoyance from low frequency noise installations in an urban environment." *Noise & Health* 5:35-46. doi: NO_DOI.

Persson Waye, K., et E. Ohrstrom. 2002. "Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise." *Journal of Sound and Vibration* 250 (1):65-73.

Persson Waye, K., et R. Rylander. 2001. "The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise." *Journal of Sound and Vibration* 240:483-497.

Persson Waye, Kerstin, Johanna Bengtsson, Anders Kjellberg, et Stephen Benton. 2001. "Low frequency noise "pollution" interferes with performance." *Noise & Health* 4:33-49.

Persson Waye, Kerstin, Angela Clow, Sue Edwards, Frank Hucklebridge, et Ragnar Rylander. 2003. "Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality." *Life Sciences* 72:863-875.

Peterson, Tarla Rai, Jennie C. Stephens, et Elizabeth J. Wilson. 2015. "Public perception of and engagement with emerging low-carbon energy technologies: A literature review." *MRS Energy & Sustainability* 2:E11.

Phillips, Carl V. 2011. "Properly interpreting the epidemiologic evidence about the health effects of industrial wind turbines on nearby residents." *Bulletin of Science, Technology & Society* 31 (4):303-315.

Pierpont, Nina. 2009. *Wind turbine syndrome: A report on a natural experiment*. Traduit par. Edité. Santa Fe: K-Selected Books

Piorr, D., et K. H. Wietlake. 1990. "Assessment of low frequency noise in the vicinity of industrial noise sources." *Journal of low frequency noise & vibration* 9:116–119.

Ponomarkov, V.V., Tysik A.Y.U, V.I. Kudryavtseva, et Barer A.S. 1969. "Biological action of intense wide-band noise on animals." *Problems of Space Biology NASA TT F-529,* (7):3007-9.

Rand, Robert W., Stephen E. Ambrose, et Carmen M. E. Krogh. 2011. "Occupational Health and Industrial Wind Turbines A Case Study." *Bulletin of Science, Technology & Society* 31 (5):359-362.

Renard, Claude. 2005. Les infrasons, nuisances rédhibitoires des éoliennes. Vent de Colère ! - Fédération nationale.

Roberts, Mark, et Jennifer Roberts. 2009. "Evaluation of the scientific literature on the health effects associated with wind turbines and low frequency sound." *B-10| Page*.

Robertson, Donald. 1984. "Horseradish peroxidase injection of physiologically characterized afferent and efferent neurones in the guinea pig spiral ganglion." *Hearing Research* 15 (2):113-121.

RTE. 2016. Bilan électrique 2015.

Ruggero, Mario A., et Andrei N. Temchin. 2002. "The roles of the external, middle, and inner ears in determining the bandwidth of hearing." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (20):13206-13210.

Saccorotti, Gilberto, Davide Piccinini, Léna Cauchie, et Irene Fiori. 2011. "Seismic Noise by Wind Farms: A Case Study from the Virgo Gravitational Wave Observatory, Italy." *Bulletin of the Seismological Society of America* 101:568-578. doi: 10.1785/0120100203.

Sakamoto, Shinichi, Sakae Yokoyama, Hiroo Yano, et Hideki Tachibana. 2014. "Experimental study on hearing thresholds for low-frequency pure tones." *Acoustical Science and Technology* 35 (4):213-218.

Salomons, Erik M., Reinhard Blumrich, et Dietrich Heimann. 2002. "Eulerian time-domain model for sound propagation over a finite-impedance ground surface. Comparison with frequency-domain models." *Acta Acustica united with Acustica* 88 (4):483-492.

Salomons, Erik, Dirk van Maercke, Jérôme Defrance, et Foort de Roo. 2011. "The Harmonoise sound propagation model." *Acta Acustica united with Acustica* 97 (1):62-74.

Salt, Alec N. 2004. "Acute endolymphatic hydrops generated by exposure of the ear to nontraumatic low-frequency tones." *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 5 (2):203-214.

Salt, Alec N., et Timothy E. Hullar. 2010. "Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines." *Hearing Research* 268 (1):12-21.

Sando, Isamu, et Minoru Ikeda. 1984. "The vestibular aqueduct in patients with Meniere's disease: a temporal bone histopathological investigation." *Acta Oto-Laryngologica* 97 (5-6):558-570.

Sawalhi, Nader, et Robert B. Randall. 2014. "Gear parameter identification in a wind turbine gearbox using vibration signals." *Mechanical Systems and Signal Processing* 42 (1):368-376.

Schmidt, Jesper Hvass, et Mads Klokker. 2014. "Health Effects Related to Wind Turbine Noise Exposure: A Systematic Review." *PLoS ONE* 9. doi: 10.1371/journal.pone.0114183.

Schomer, P. D., Y. Suzuki, et F. Saito. 2001. "Evaluation of loudness-level weightings for assessing the annoyance of environmental noise." *The Journal of the Acoustical Society of America* 110 (5 Pt 1):2390-2397.

Schreckenberg, Dirk, Markus Meis, Cara Kahl, Christin Peschel, et Thomas Eikmann. 2010. "Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 7 (9):3382-3405.

Shepherd, Daniel. 2010. "Wind turbine noise and health in the New Zealand context." *Sound, Noise, Flicker and the Human Perception of Wind Farm Activity. Palmerston North, New Zealand: Atkinson and Rapley Consulting Ltd*:13-63.

Shepherd, Daniel, et Rex Billington. 2011. "Mitigating the Acoustic Impacts of Modern Technologies Acoustic, Health, and Psychosocial Factors Informing Wind Farm Placement." *Bulletin of Science, Technology & Society* 31:389-398.

Shepherd, Daniel, David McBride, David Welch, Kim N. Dirks, et Erin M. Hill. 2011. "Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life." *Noise & Health* 13 (54):333-339. doi: 10.4103/1463-1741.85502.

Shepherd, Daniel, David Welch, ErinM Hill, David McBride, et KimN Dirks. 2011. "Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life." *Noise and Health* 13 (54):333-339. doi: 10.4103/1463-1741.85502.

Silva, M. J., A. Carothers, N. a. A. Castelo Branco, A. Dias, et M. G. Boavida. 1999. "Sister chromatid exchange analysis in workers exposed to noise and vibration." *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 70:A40-A45.

Silva, M. J., A. Dias, A. Barreta, P. J. Nogueira, N. a. A. Castelo-Branco, et M. G. Boavida. 2002. "Low frequency noise and whole-body vibration cause increased levels of sister chromatid exchange in splenocytes of exposed mice." *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis* 22:195-203.

Sinayoko, Samuel. 2015. "Broadband noise for rotating blades: analysis of acceleration effects in the time and frequency domains." 2015.

Sinayoko, Samuel, Mahdi Azarpeyvand, et Benshuai Lyu. 2014. "Trailing edge noise prediction for rotating serrated blades." 2014.

Skouras, Stavros, Marcus Gray, Hugo Critchley, et Stefan Koelsch. 2013. "fMRI scanner noise interaction with affective neural processes." *PLoS ONE* 8 (11):e80564.

Smith, A. 2003. "The concept of noise sensitivity: implications for noise control." *Noise & Health* 5 (18):57-59. doi: NO_DOI.

SouthAustralia-EPA. 2009. Wind farm environmental noise Guidelines.

SouthAustralia-EPA. 2013. Waterloo Wind Farm Environmental Noise Study.

Tachibana, Hideki, Hiroo Yano, Akinori Fukushima, et Shinichi Sueoka. 2014. "Nationwide field measurements of wind turbine noise in Japan." *Noise Control Engineering Journal* 62:90-101. doi: 10.3397/1/376209.

Tait, John. 1932. "Is All Hearing Cochlear?" *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology* 41 (3):681-704.

Tamura, Haruka, Nobutaka Ohgami, Ichiro Yajima, Machiko Iida, Kyoko Ohgami, Noriko Fujii, Hiroyuki Itabe, Tastuya Kusudo, Hitoshi Yamashita, et Masashi Kato. 2012. "Chronic exposure to low frequency noise at moderate levels causes impaired balance in mice." *PLoS ONE* 7. doi: 10.1371/journal.pone.0039807.

Taylor, Jennifer, Carol Eastwick, Robin Wilson, et Claire Lawrence. 2013. "The influence of negative oriented personality traits on the effects of wind turbine noise." *Personality and Individual Differences* 54:338–343.

Tian, Yuan, et Benjamin Cotté. 2015. "Modelling of ground and atmospheric effects on wind turbine noise." 5th Wind Turbine Noise Conference, Glasgow, 2015.

Todd, Neil. 2001. "Evidence for a behavioral significance of saccular acoustic sensitivity in humans." *The Journal of the Acoustical Society of America* 110:380-390.

Todd, Neil P. McAngus, Sally M. Rosengren, et James G. Colebatch. 2008. "Tuning and sensitivity of the human vestibular system to low-frequency vibration." *Neuroscience letters* 444 (1):36-41.

Toke, Dave. 2005. "Explaining wind power planning outcomes:: some findings from a study in England and Wales." *Energy Policy* 33 (12):1527-1539.

Tonin, Renzo, James Brett, et Ben Colagiuri. 2016. "The effect of infrasound and negative expectations to adverse pathological symptoms from wind farms." *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 35 (1):77-90.

Turnbull, Chris, Jason Turner, et Daniel Walsh. 2012. "Measurement and level of infrasound from wind farms and other sources." *Acoustics Australia* 40 (1):45-50.

Uran, S. L., L. G. Caceres, et L. R. Guelman. 2010. "Effects of loud noise on hippocampal and cerebellar-related behaviors.: Role of oxidative state." *Brain Research* 1361:102-114.

US-EPA. 1974. Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety. In *The EPA "Levels" Document*.

van den Berg, Frits, Eja Pedersen, Jelte Bouma, et Roel Bakker. 2008. "Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents: Final report."

Van den Berg, G. P., Eja Pedersen, Jelte Bouma, et Roel Bakker. 2008. "Project WINDFARMperception: visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents." *Final report, June* 3.

van den Berg, Godefridus Petrus. 2006. "The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise." Google Scholar.

Van Renterghem, Timothy, Annelies Bockstael, Valentine De Weirt, et Dick Botteldooren. 2013. "Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise." *Science of The Total Environment* 456–457:333-345. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.095.

Verzini, A. M., A. H. Skarp, H. Nitardi, et G. L. Fuchs. 1999. "A laboratory experiment on very low frequency sounds effects." *Applied Acoustics* 57:69-77.

Von-Hunerbein, S. U. M., A. T. Moorhouse, D. Fiumicelli, et D. Baguley. 2013. "Health impacts of wind turbines." [Monograph], Dernière modification mai 2, 2013.

Wagner, Siegfried, Rainer Bareiß, et Gianfranco Guidati. 1996. *Wind Turbine Noise*. Traduit par. Edité. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Warren, Charles R., Carolyn Lumsden, Simone O'Dowd, et Richard V. Birnie. 2005. "'Green on green': public perceptions of wind power in Scotland and Ireland." *Journal of Environmental Planning and Management* 48 (6):853-875.

Watanabe, Toshio, et HENRIK Møller. 1990. "Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field." *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 9:106-115.

Waye, Persson, Bengtsson J, Kjellberg A, et Benton S. 2001. "Low frequency noise "pollution" interferes with performance." *Noise and Health* 4.

Wolsink, Maarten. 2000. "Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support." *Renewable Energy* 21 (1):49-64.

Wolsink, Maarten. 2007. "Wind power implementation: the nature of public attitudes: equity and fairness instead of 'backyard motives'." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (6):1188-1207.

Xi_Engeneering_Consultants. 2014. Seismic vibration produced by wind turbines in the Eskdalemuir region. Xi Engeneering Consultants

Yamada, S., M. Ikuji, S. Fujikata, T. Watanabe, et T. Kosaka. 1983. "Body sensation of low frequency noise of ordinary persons and profoundly deaf persons." *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 2:32-36.

Yazawa, Yoshiro, et Masaaki Kitahara. 1994. "Computerized tomography of the petrous bone in Meniere's disease." *Acta Oto-Laryngologica* 114 (sup510):67-72.

Yokoyama, Sakae, Shinichi Sakamoto, et Hideki Tachibana. 2013. "Study on the amplitude modulation of wind turbine noise: part 2–Auditory experiments." *InterNoise13*.

Yokoyama, Sakae, Shinichi Sakamoto, et Hideki Tachibana. 2014. "Perception of low frequency components in wind turbine noise." *Noise Control Engineering Journal* 62:295-305. doi: 10.3397/1/376228.

Yokoyama, Sakae, Shinichi Sakamoto, Sohei Tsujimura, Tomohiro Kobayashi, et Hideki Tachibana. 2015. "Loudness experiment on general environmental noises considering low-frequency components down to infrasound." *Acoustical Science and Technology* 36 (1):24-30. doi: 10.1250/ast.36.24.

Yuan, Hua, Hua Long, Jing Liu, Lili Qu, Jingzao Chen, et Xiang Mou. 2009. "Effects of infrasound on hippocampus-dependent learning and memory in rats and some underlying mechanisms." *Environmental toxicology and pharmacology* 28 (2):243-247.

Zajamšek, Branko, Kristy L. Hansen, Con J. Doolan, et Colin H. Hansen. 2016. "Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise." *Journal of Sound and Vibration* 370:176-190. doi: 10.1016/j.jsv.2016.02.001.

Zajamsek, Branko, Danielle J. Moreau, et Con J. Doolan. 2014. "Characterising noise and annoyance in homes near a wind farm." *Acoustics Australia* 42.

Zhu, W.J., et W.Z. Shen. 2015. "Numerical simulation of airfoil trailing edge serration noise." Wind tubine noise, Glasgow.

8.2 Normes

DIN 45680:1997 *Measurement and assessment of low-frequency noise immissions in the neighbourhood*.

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

NF S 30-101 (AFNOR, 1973). Vocabulaire de l'Acoustique – Définitions générales.

NF EN 61400-11 (décembre 2004) Aérogénérateurs - Partie 11 : techniques de mesure du bruit acoustique.

NZS 6808:2010 *Acoustics – Wind farm noise.*

ISO/R 226:1961 Lignes isosoniques normales pour sons purs écoutés en champ libre et seuil d'audition binauriculaire en champ libre.

ISO 7196:1995 Acoustique – Pondération fréquentielle pour le mesurage des infrasons.

ISO 9613-1:1993 Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre -- Partie 1: Calcul de l'absorption atmosphérique.

SS 4604861:1996 - *Vibration and shock - Measurement and guidelines for the evaluation of comfort in buildings.*

SS 25267:2015 - *Acoustics - Sound classification of spaces in buildings – Dwellings.*

SS 25268:2007 - *Acoustics - Sound classification of spaces in buildings - Institutional premises, rooms for education, preschools and leisure-time centres, rooms for office work and hotels.*

8.3 Législation et réglementation

Arrêté du 24 avril 2016 relatif aux objectifs de développement des énergies renouvelables.

Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement.

Bund-Länder Initiative Windenergie, 2012 : *Überblick zu den landesplanerischen Abstandsempfehlungen für die Regionalplanung zur Ausweisung von Windenergiegebieten, Bund-Länder Initiative Windenergie, Stand Januar 2012, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

Circulaire du 24 juillet 1990 relative à la mise en place des périmètres de protection des points de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine (art. L. 20 du code de la santé publique). NOR: SPSP9001537C, J.O n° 212 du 13 septembre 1990.

Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement.

Concept-Circulaire geluidhinder veroorzaakt door windturbines (bijlage bij 31209, nr. 99).

Decret 2002 : Décret du Ministre du travail et des affaires sociales du 29 Novembre 2002 (*on maximum admissible concentration and maximum admissible intensity values for agents harmful to human health in the work environment.* Off J Laws 2002;217,1833 (avec derniers amendements : Off J Laws 2005;212,1769).

Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

LPE 1983 : Loi fédérale modifiée du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement.

ORD 814.41 Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) du 15 décembre 1986.

ORD 814.011 Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE).

SO 821, 1997 : *Statutory Orders no*. 821 of 23. Octobre 1997.

SO 1518, 2006 : *Bekendtgørelse om støj fra vindmøller / Statutory Orders on noise from wind turbines n°1518 of 14 December 2006 - Miljøministeriet* (Ministère de l'environment).

SO 1284, 2011 : *Bekendtgørelse om støj fra vindmøller (Statutory Order on noise from wind turbines), n°1284, Miljøministeriet* (Ministère de l'environment), 15 décembre 2011.

Socialstyrelsen SOSFS 2005:6 The National Board of Health and Welfare's general advice SOSFS on indoor noise.

WKA, 2005: *Grundsätze für Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen* (WKA-Erl.) *Gem. RdErl. d. Ministeriums für Bauen und Verkehr* − VI A 1 - 901.3/202 −, *d. Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz* − VII 8 - 30.04.04 − *u. d. Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie* – IV A 3-00-19 – v. 21.10.2005.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

2013 -SA- 0 1 1 5

COURRIER ARRIVE
0 4 JUIL. 2013
DIRECTION GENERALE

MINISTÈRE DES AFFAIRES SOCIALES ET DE LA SANTÉ
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE

Direction générale de la santé

Sous-direction de la prévention des risques liés à l'environnement et à l'alimentation

n° 106

ANSES Reçu le
4 JUIL. 2013

Direction générale de la prévention des risques

Service de la prévention des nuisances et de la qualité de l'environnement

Service des risques technologiques

Paris, le 27 JUIN 2013

Le Directeur général de la santé

La Directrice générale de la prévention des risques

à

Monsieur le Directeur général de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Objet : Effets sur la santé des basses fréquences et infrasons dus aux parcs éoliens

Le développement des éoliennes comme source d'énergie électrique renouvelable a conduit à s'interroger sur leur potentialité à produire des sons de basses fréquences (20 Hz à 200 Hz) et des infrasons (inférieurs à 20 Hz) dangereux pour la santé.

En mars 2006, l'Académie nationale de médecine a considéré, dans un rapport concernant le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'homme, que l'impact sonore des parcs éoliens était comparable à celui des aéroports, des infrastructures de transports ou des usines. Ce rapport recommandait une classification des parcs éoliens en *« zone industrielle »* et une distance minimale de 1500 mètres des habitations.

Saisie alors par la DPPR et la DGS pour étudier les impacts sanitaires du bruit engendré par les éoliennes, l'AFSSET a estimé dans son rapport *Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes* de mars 2008 que les émissions sonores des éoliennes ne généraient pas de conséquences sanitaires directes tant au niveau de l'appareil auditif que des effets liés à l'exposition aux basses fréquences et aux infrasons. Ce rapport juge également que l'énoncé systématique d'une distance minimale d'éloignement de 1500 mètres, sans prendre en compte l'environnement (notamment topographique) du parc éolien, ne semblait pas pertinent.

Depuis 2008, le rapport de la mission d'information de l'Assemblée nationale sur l'énergie éolienne du 31 mars 2010, des questions parlementaires ainsi que des reportages dans les médias ont souligné l'absence d'enquête scientifique en situation réelle de cette étude. En effet, le rapport de l'AFSSET s'appuie sur une recherche bibliographique, des simulations d'émissions sonores de parcs éoliens et une enquête auprès des DDASS (alors en charge du traitement des plaintes).

La réglementation relative aux éoliennes a depuis été modifiée avec l'introduction de distances minimales d'implantation de 500 mètres de toute habitation puis le classement des parcs éoliens dans le régime des ICPE (textes du 26 août 2011). Ces textes prévoient des mesures de bruit dans les bandes d'octave de 125 à 4000 Hz. Les très basses fréquences et les infrasons, plus difficiles à mesurer, ne sont actuellement pas pris en compte.

Toutefois, des plaintes de riverains concernant le bruit des éoliennes sont signalées par les DREAL à la DGPR. Des plaintes concernent notamment le site de Saint-Servant-sur-Oust (56), et, pour une gêne spécifiquement liée aux basses fréquences et aux infrasons, le site de Freycenet-la-Tour-Moudeyres (43).

Afin d'établir une base de connaissance étayée et de parvenir à des conclusions solides concernant les effets sur la santé des basses fréquences et des infrasons dus aux parcs éoliens, nous vous demandons :

- de conduire une revue des connaissances disponibles en matière d'effets sanitaires auditifs et extra-auditifs dus aux parcs éoliens, en particulier dans les basses fréquences et les infrasons ;
- d'étudier les réglementations mises en œuvre dans les pays, notamment européens, confrontés aux mêmes problèmes ;
- de mesurer l'impact sonore de parcs éoliens, en prenant en compte les contributions de basses fréquences et des infrasons, notamment de ceux où une gêne est signalée par les riverains ;
- de proposer, sur le fondement de ces études, des pistes d'amélioration de la prise en compte de ces éventuels effets sur la santé dans la réglementation, ainsi que des préconisations permettant de mieux appréhender ces effets sanitaires dans les études d'impact des projets éoliens.

Nous vous demandons de bien vouloir nous faire part des résultats de cette saisine au plus tard à l'automne 2014.

Nous souhaitons enfin que ces travaux soient réalisés en collaboration étroite avec nos services.

Le Directeur Général de la Santé

Jean-Yves GRALL

La Directrice Générale de la Prévention des Risques

Patricia BLANC

Annexe 2 : Grille de lecture bibliographique

Partie 1 : identification du document

Identité de l'article			Type d'étude	
Référence de l'article	Titre	Type de document	Objectif(s) de l'étude	Type d'étude
[auteur-année]	*[titre]*	• article scientifique • thèse • rapport • proceedings • autre	*[texte libre]*	• Epidémiologie • expérimental chez l'Humain • expérimental chez l'animal • cas d'étude • autre

Partie 2 : caractérisation de l'exposition

Partie Exposition					
Source sonore étudiée	Type de son	Caractérisation de l'exposition	Conditions d'exposition (système expo; durée...etc)	Commentaires lecteur 1	Commentaires lecteur 2
• parc éolien • chambre d'exposition • transports • sources environnementales • expo professionnelle	• infrasons • basses fréquences • bruit audible • toutes fréquences	• oui, maîtrisée • oui, mesurée • oui, calculée • non	*[texte libre]*	*[texte libre]*	*[texte libre]*

Partie 3 : caractérisation de l'étude des effets

Description de la population étudiée		Effets			Conclusions de l'article		
Nb sujets	autres caractéristiques	Effet étudié	Présence de contrôles (positifs-négatifs)	Paramètres mesurés		Commentaires lecteur 1	Commentaires lecteur 2
[texte libre]	*[texte libre]*	*[texte libre]*	• oui • non	• mesures physiologiques • questionnaire • autre	*[texte libre]*	*[texte libre]*	*[texte libre]*

Partie 4 : conclusions de l'analyse

Liens d'intérêts	CONCLUSIONS		
Sources de financements	Conclusions GT	Qualité des travaux	Pertinence du sujet
[texte libre]	*[texte libre]*	• exploitable • biais mineur (expo / effets / méthodologie) • biais majeur (expo / effets / méthodologie)	• très pertinent • pertinent • peu pertinent • hors sujet • non exploitable (revue de littérature) • non exploitable (pas d'étude, opinion) • non exploitable (ni en français, ni en anglais)

Annexe 3 : Liste des documents identifiés, non retenus pour l'évaluation des risques et non discutés dans le rapport

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Abbasi	2015	Effect of Wind Turbine Noise on Workers' Sleep Disorder: A Case Study of Manjil Wind Farm in Northern Iran	Faible pertinence : exposition professionnelle Biais majeurs (méthodologie)
Abrams	1991	Occupational vibration during pregnancy	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Abrams	1996	Vibration of the abdominal segment in pregnant sheep	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Aguas	1999	Effect low frequency noise exposure on BALB/c mice splenic lymphocytes.	VAD, voir chapitre 6.4.1
Akhmetzianov	2011	[Hygienic estimation of combined influence of noise and infrasound on the organism of military men]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Alayrac	2009	Indicateurs de gêne sonore pour l'étude d'impact du bruit d'un site industriel : caractérisation physique et perceptive	Faible pertinence : bruit toutes fréquences
Alberts	2006	Addressing wind turbine noise	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Alimohammadi	2013	The effects of low frequency noise on mental performance and annoyance	Biais majeurs (méthodologie)
Alves-Pereira	1999	Noise-induced extra-aural pathology : A review and commentary	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue) VAD, voir chapitre 6.4.1
Alves-Pereira	2003	Noise and the respiratory system	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue) VAD, voir chapitre 6.4.1
Alves-Pereira	2007	Vibroacoustic disease: Biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue) VAD, voir chapitre 6.4.1
Alves-Pereira	2013	Wind turbine health impact study: Report of independent expert panel	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion) VAD, voir chapitre 6.4.1
Alves-Pereira	2014	Letter to the Editor re:'How the factoid of wind turbines causing 'vibroacoustic disease'came to be 'irrefutably demonstrated''	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion) VAD, voir chapitre 6.4.1
Antunes	2013	Histomorphometric evaluation of the coronary artery vessels in rats submitted to industrial noise	VAD, voir chapitre 6.4.1
Antunes	2013	Immunohistochemical evaluation of cardiac connexin43 in rats exposed to low-frequency noise	VAD, voir chapitre 6.4.1

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Antunes	2013	Myocardial fibrosis in rats exposed to low frequency noise	VAD, voir chapitre 6.4.1
Anund	2015	The Effect of Low-Frequency Road Noise on Driver Sleepiness and Performance	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Aslund	2013	Projected contributions of future wind farm development to community noise and annoyance levels in Ontario, Canada	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments nouveaux exploitables pour l'évaluation de risque (EQRS)
Balunov	1998	[Clinical and functional evaluation of health status of workers exposed to infrasound, noise and general vibration]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Basner	2014	Auditory and non-auditory effects of noise on health	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue de littérature)
Baxter	2013	A case-control study of support/opposition to wind turbines: Perceptions of health risk, economic benefits, and community conflict	Non exploitable : le document n'est pas une évaluation de risque (SHS) Éléments repris dans un article plus récent (Ellis 2015)
Bengtsson	2003	Low frequency noise during work. Effects on performance and annoyance	Éléments repris dans un article plus récent (Bengtsson, Waye, et Kjellberg 2004)
Bengtsson	2004	Evaluations of effects due to low-frequency noise in a low demanding work situation	Éléments repris dans un article plus récent (Bengtsson, Waye, et Kjellberg 2004)
Bilski	2013	Exposure to audible and infrasonic noise by modern agricultural tractors operators	Faible pertinence : exposition professionnelle
Bilski	2013	Audible and infrasonic noise levels in the cabins of modern agricultural tractors--does the risk of adverse, exposure-dependent effects still exist?	Faible pertinence : exposition professionnelle
Bolin	2011	Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Bradley	1994	Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Castelo Branco	1999	The human pericardium in vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Castelo Branco	1999	Vibroacoustic disease : Some forensic aspects	VAD, voir chapitre 6.4.1
Castelo Branco	1999	A unique case of Vibroacoustic disease : A tribute to an extraordinary patient	VAD, voir chapitre 6.4.1
Castelo Branco	1999	The clinical stages of Vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Castelo Branco	2005	The Pericardium in Vibroacoustic Disease II–Cellular Death Pathways	VAD, voir chapitre 6.4.1

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Castelo Branco	2005	Vibroacoustic disease - 25 years of continuous research	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue de littérature)
Castelo Branco	2010	Vibroacoustic Disease-A Review	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue de littérature)
Castelo Branco	2015	Low Frequency Noise-Induced Pathology: Contributions Provided by the Portuguese Wind Turbine Case	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue de littérature)
Castro	1999	Increase in CD8+ and CD4+ T lymphocytes in patients with vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Cavacas	2013	Effects of industrial noise on circumpulpar dentin--a field emission scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy analysis	VAD, voir chapitre 6.4.1
Chang	2012	Noise frequency components and the prevalence of hypertension in workers	Faible pertinence : exposition professionnelle
Chapman	2014	Factoid Forensics: Have "more than 40" Australian families abandoned their homes because of wind farm noise?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Chapman	2014	Fomenting Sickness: Nocebo Priming of Residents about Expected Wind Turbine Health Harms	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Chiovenda	2007	Environmental noise-exposed workers: Event-related potentials, neuropsychological and mood assessment	Faible pertinence : exposition professionnelle
Clarke	2011	Wind farm location and environmental impact	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Colby	2010	Wind turbine sound and health effects : an expert panel review	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Crichton	2014	The Link between Health Complaints and Wind Turbines: Support for the Nocebo Expectations Hypothesis	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
da Fonseca	2006	Noise-induced gastric lesions: a light and scanning electron microscopy study of the alterations of the rat gastric mucosa induced by low frequency noise	VAD, voir chapitre 6.4.1
Dang	2007	[Effects of infrasound on activities of 3beta hydroxysteroid dehydrogenase and acid phosphatase of polygonal cells in adrenal cortex zona fasciculate in mice]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Dang	2008	[Characteristics of infrasound and its influence on workers in working environment of certain thermoelectricity works and department].	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
De Sousa Pereira	1999	Morphofunctional study of rat pleural mesothelial cells exposed to low frequency noise.	VAD, voir chapitre 6.4.1
De Sousa Pereira	1999	The effect of chronic exposure to low frequency noise on rat tracheal epithelia	VAD, voir chapitre 6.4.1
Di 2015		Annoyance response to low frequency noise with tonal components: A case study on transformer noise	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Dickinson	2009	Nonsense on stilts	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Doolan	2013	An on-demand simultaneous annoyance and indoor noise recording technique	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (modèle)
Dooley	2013	Significant infrasound levels a previously unrecognized contaminant in landmark motion sickness studies	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (modèle)
Dubois	2006	Du signal acoustique aux significations psychoacoustiques et recherches cognitives	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Enbom	2013	[Infrasound from wind turbines--an overlooked health hazard]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Eom	2014	[Low frequency noise and tis psychological effects]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Eriksson	2014	Long-Term Aircraft Noise Exposure and Body Mass Index, Waist Circumference, and Type 2 Diabetes: A Prospective Study	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Evans	1972	Some effects of infrasonic noise in transportation	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Farboud	2013	Wind turbine syndrome': fact or fiction?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Ferrer-Marti	2012	Evaluating and comparing three community small-scale wind electrification projects	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Fidell	2010	Research plans for improving understanding of effects of very low-frequency noise of heavy lift rotorcraft	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Firestone	2015	See me, Feel me, Touch me, Heal me: Wind turbines, culture, landscapes, and sound impressions	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS) Éléments repris dans un article plus récent (Ellis 2015)
Fiumicelli	2011	Windfarm noise dose-response: a literature review	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Foreid	2005	Behavioral and Psychological Changes in Vibroacoustic Disease	VAD, voir chapitre 6.4.1

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Foreid	2005	Neurological disorders in vibroacoustic disease I – Current findings	VAD, voir chapitre 6.4.1
Foreid	2005	Neurological disorders in vibroacoustic disease I - Current findings	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Frey	2007	Noise radiation from wind turbines installed near homes: effects on health	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Frey	2012	Wind Turbines and Proximity to Homes: The Impact of Wind Turbine Noise on Health	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Gastavino	2003	Étude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Gastemeier	2008	Recent studies of infrasound from industrial sources	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Gavreau	1996	Infrasound: Generators, Detectors, Physical Qualities, Biological Effects	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Gehring	2014	Impact of noise and air pollution on pregnancy outcomes	Faible pertinence : bruit toutes fréquences
Groth	2014	Rural wind farm development: Social, environmental and economic features important to local residents	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Guest	2011	An observed relationship between vestibular function and auditory thresholds in aircraft-maintenance workers	Faible pertinence : exposition professionnelle
Hanning	2012	Wind turbine noise	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Hansen	2007	The Effects of Low Frequency Noise and Vibration on People	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Hanson	2010	Health effects of exposure to ultrasound and infrasound: report of the independent advisory group on non-ionising radiation	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Harrison	2011	Wind turbine noise - an overview	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Harrison	2014	On the biological plausibility of Wind Turbine Syndrome	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Harry	2007	Wind turbines, noise and health	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Havas	2011	Wind Turbines Make Waves Why Some Residents Near Wind Turbines Become Ill	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Horner	2011	Litterature reviews on wind turbines and health: are they enough?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Howe	2011	Addressing low frequency sound and infrasound from wind turbines	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Howell	2015	Autism and the effect of introducing a new noise source into quiet rural communities:risk f actor from industrial wind power generation	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Huang	2003	[The psychological effect of minesweeping infrasonic field]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Ising	2004	Low frequency noise and stress: bronchitis and cortisol in children exposed chronically to traffic noise and exhaust fumes	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
James	2012	Wind Turbine Infra and Low-Frequency Sound Warning Signs That Were Not Heard	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Jeffery	2013	Adverse health effects of industrial wind turbines	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Jeffery	2013	Industrial wind turbine and adverse health effects	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Johnson	1980	The Effects of High Level Infrasound	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue) Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Jung	2008	Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Kamperman	2008	The "how to" guide to criteria for siting wind turbines to prevent health risks from sound	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Kantarelis	1988	The identification and subjective effect of amplitude modulation in diesel engine exhaust noise	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Kawano	1991	Effects of Infrasound on Humans. A Questionnaire Survey of 145 Drivers of Long Distance Transport Trucks.	Faible pertinence : exposition professionnelle
Keith	2008	A proposal for evaluating the potential health effects of wind turbine noise for projects under the Canadian Environmental Assessment Act	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
King	2003	Community noise: Health effects and management	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Kjellberg	1984	An assessment of dB(A) for predicting loudness and annoyance of noise containing low frequency components	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Kjellberg	1997	Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Knopper	2011	Health effects and wind turbines: A review of the literature	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Krogh	2011	WindVOiCe, a self-reporting survey: adverse health effects, industrial wind turbines, and the need for vigilance monitoring	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (méthodologie)
Krohn	1999	On Public Attitudes Towards Wind Power	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue) Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Lachat	2011	Eoliennes et santé humaine	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Landstrom	1987	laboratory and field studies on infrasound and its effects on humans	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Landstrom	1995	Exposure levels, tonal components, and noise annoyance in working environments	Faible pertinence : exposition professionnelle
Lee	2010	Perception of modulated-amplitude noise from wind turbines	Faible pertinence : bruit toutes fréquences
Lee	2010	Evoked response of heart rate variability using short-duration white noise	Faible pertinence : bruit toutes fréquences
Lee	2011	Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise	Faible pertinence : bruit toutes fréquences
Lenchine	2009	Amplitude modulation in wind turbine noise	Faible pertinence : bruit toutes fréquences
Leroux	2007	Évaluation des impacts sur la santé des populations vivant à proximité des parcs éoliens.	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Leung	2012	Wind energy development and its environmental impact: A review	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Leventhall	2006	Infrasound from wind turbines-fact, fiction or deception	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Lundqvist	2000	Annoyance and effects on work from environmental noise at school	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Lundqvist	2000	Low frequency noise and annoyance in classroom	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Madsen	2006	Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Mahendra Prashanth	2008	The relationship between noise frequency components and physical, physiological and psychological effects of industrial workers	Faible pertinence : exposition professionnelle

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Mahendra Prashanth	2011	The possible influence of noise frequency components on the health of exposed industrial workers - A review	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue) Faible pertinence : exposition professionnelle
Manley	2002	Perceptions of the Public of Low Frequency Noise	Faible pertinence : mesures d''exposition uniquement
Marciniak	1999	Echocardiographic evaluation in 485 aeronautical workers exposed to different noise environments	VAD, voir chapitre 6.4.1
Martinho Pimenta	1999	Epilepsy in the vibroacoustic disease: a case report	VAD, voir chapitre 6.4.1
Martinho Pimenta	1999	Neurological aspects of vibroacoustic disease.	VAD, voir chapitre 6.4.1
Martinho Piment	1999	Balance disturbances in individuals with vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Martinho Pimenta	1999	The palmo-mental reflex in Vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Mc Cubbin	2013	Quantifying the health and environmental benefits of wind power to natural gas	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Mc Cunney	2015	Wind turbines and health: An examination of a proposed case definition	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Mc Murtry	2011	Toward a Case Definition of Adverse Health Effects in the Environs of Industrial Wind Turbines: Facilitating a Clinical Diagnosis	VAD, voir chapitre 6.4.1
Mc Murtry	2014	Diagnostic criteria for adverse health effects in the environs of wind turbines	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Meier	2014	Associations of short-term particle and noise exposures with markers of cardiovascular and respiratory health among highway maintenance workers	Faible pertinence : exposition professionnelle
Mendes	2014	Noise rich in low frequency components, a new comorbidity for periodontal disease? An experimental study	VAD, voir chapitre 6.4.1
Murphy	2014	An assessment of residential exposure to environmental noise at a shipping port	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Nakashima	2007	Hearing, communication and cognition in low-frequency noise from armoured vehicles	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Oliveira	1999	Effects of low frequency noise upon the reaction of pleural Milky Spots to mycobacterial infection	VAD, voir chapitre 6.4.1

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Oliveira	2001	In Utero and Postnatal Exposure of Wistar Rats to Low Frequency/High Intensity Noise Depletes the Tracheal Epithelium of Ciliated Cells	VAD, voir chapitre 6.4.1
Oliveira	2002	Chronic exposure of rats to cotton-mill-room noise changes the cell composition of the tracheal epithelium	VAD, voir chapitre 6.4.1
Oliveira	2003	Reduction of rat pleural microvilli caused by noise pollution	VAD, voir chapitre 6.4.1
Oliveira	2005	Arrest in ciliated cell expansion on the bronchial lining of adult rats caused by chronic exposure to industrial noise	VAD, voir chapitre 6.4.1
Oliveira	2007	Low-frequency noise effects on the parotid gland of the Wistar rat	VAD, voir chapitre 6.4.1
Oliveira	2009	Chronic exposure of rats to occupational textile noise causes cytological changes in adrenal cortex	VAD, voir chapitre 6.4.1
Oliveira	2014	Noise rich in low frequency components, a new comorbidity for periodontal disease? An experimental study	VAD, voir chapitre 6.4.1
Ollson	2013	Are the findings of "Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health" supported?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Paes Cardoso	2006	Effects of long term exposure to occupational noise on textile industry workers' lung function	VAD, voir chapitre 6.4.1
Palmer	2013	Wind turbine sound prediction-the consequence of getting it wrong	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Panuzca 2002		[Infrasounds and biorhythms of the human brain]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Pawlaczyk-Luszczyńska	2005	The impact of low-frequency noise on human mental performance	Éléments repris dans un article plus récent (Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.* 2014)
Pedersen	2003	Noise annoyance from wind turbines - a review	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Pedersen	2007	Human response to wind turbine noise-perception, annoyance and moderating factors	Éléments repris dans un article plus récent (Pedersen 2011)
Pedersen	2008	The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines	Éléments repris dans un article plus récent (Pedersen 2011)
Pedersen	2008	Wind turbines—low level noise sources interfering with restoration?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Pedersen	2008	Human hearing at low frequencies with focus on noise complaints	Éléments repris dans un article plus récent (Pedersen 2011)
Pedersen	2008	A Detailed Study of Low-Frequency Noise Complaints	Éléments repris dans un article plus récent (Pedersen 2011)
Pedersen	2009	Effects of wind turbine noise on humans	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Pei	2007	Infrasound-induced hemodynamics, ultrastructure, and molecular changes in the rat myocardium	VAD, voir chapitre 6.4.1
Persinger	2014	Infrasound, human health, and adaptation: an integrative overview of recondite hazards in a complex environment	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Persson Waye	1997	Effects on performance and work quality due to low frequency ventilation noise	Éléments repris dans un article plus récent (K. Persson Waye *et al.* 2003)
Persson Waye	2002	Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance	Éléments repris dans un article plus récent (Persson Waye *et al.* 2004)
Persson Waye	2004	Effects of low-frequency noise on sleep	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Phillips	2010	An analysis of the epidemiology and related evidence on the health effects of wind turbines on local residents	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion) Faible pertinence : éléments repris dans un article plus récent (Phillips 2011)
Pimenta	1999	Facial dyskinesia induced by auditory stimulation: a report of four cases.	VAD, voir chapitre 6.4.1
Pimenta	1999	ERP P300 and brain magnetic resonance imaging in patients with vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Qibai	2004	An investigation on the physiological and psychological effects of infrasound on persons	Biais majeurs (méthodologie, interprétation des résultats)
Ranke	2014	A Wind Farm as a Controversial Landscape Phenomenon : A qualitative study of local residents' attitudes towards wind power implementation in their neighborhood	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Reinhold	2014	Exposure to high or low frequency noise at workplaces: differences between assessment, health complaints and implementation of adequate personal protective equipment	Faible pertinence : exposition professionnelle
Reis Ferreira	1999	Airway flow limitation in patients with vibroacoustic disease.	VAD, voir chapitre 6.4.1
Reis Ferreira	2006	Abnormal respiratory drive in vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Reis Ferreira	2006	Respiratory squamous cell carcinomas in vibroacoustic disease	VAD, voir chapitre 6.4.1
Reis Ferreira	2006	Involvement of central airways in vibroacoustic disease patients	VAD, voir chapitre 6.4.1
Rideout	2010	Wind turbine and health	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Roberts	2013	Wind turbines: is there a human health risk?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Sabra	2011	Passive structural health monitoring of a high-speed naval ship from ambient vibrations	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Salt	2011	Infrasound from wind turbines could affect humans	Éléments déjà disponibles (Salt et Hullar 2010)
Salt	2014	How Does Wind Turbine Noise Affect People?	Éléments déjà disponibles (Salt et Hullar 2010)
Schomer	2013	Comments on Recently Published Article,"Concerns about Infrasound from Wind Turbines"	Non exploitable Le document n'est pas article source (opinion)
Schomer	2013	A critical analysis of: Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Schomer	2015	A theory to explain some physiological effects of the infrasonic emissions at some wind farm sites	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Schust	2004	Effects of low frequency noise up to 100 Hz	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Seltenrich	2014	Wind Turbines: A Different Breed of Noise?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Shepherd	1991	Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines.	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Shepherd	2011	Wind turbine noise and health-related quality of life of nearby residents: a cross sectional study in New Zealand	Éléments déjà disponibles dans un autre article (Shepherd, Welch, *et al.* 2011)
Shepherd	2014	Annoyance and Health-Related Quality of Life: A Cross-Sectional Study Involving Two Noise Sources	Éléments déjà disponibles dans un autre article (Shepherd, Welch, *et al.* 2011)
Shitskova	1991	[Noise, infrasound and vibration as factors of urban environment]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais
Siponen	2011	Noise annoyance of wind turbines	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Sloven	2015	Social assessment of environmental low frequency noise	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Smith	2013	On the influence of freight trains on humans: a laboratory investigation of the impact of nocturnal low frequency vibration and noise on sleep and heart rate	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes

Auteur	Année	Titre	Motif d'exclusion de l'analyse des risques sanitaires
Smith	2014	Freight trains, nocturnal vibration and noise, and their physiological effects during sleep	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Soldatov	2010	[Occupationally mediated morbidity in aviation specialists]	Non exploitable : le document n'est disponible ni en français ni en anglais Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Songsore	2014	Social responses to wind energy development in Ontario: The influence of health risk perceptions and associated concerns	Non exploitable : le document ne contient pas d'éléments exploitables pour l'évaluation de risque sanitaire (SHS)
Tabassum-Abbasi	2014	Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Thorne	2010	The Problems With "Noise Numbers" for Wind Farm Noise Assessment	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Timmerman	2013	Wind Turbine Noise	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Torija	2015	The subjective effect of low frequency content in road traffic noise	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
van der Horst	2007	NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)
Walker	2014	Adding insult to injury: The development of psychosocial stress in Ontario wind turbine communities	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Wolsink	1993	Wind turbine noise: a new environmental threat?	Non exploitable : le document n'est pas un article source (opinion)
Zhuang	2007	Infrasound-induced changes on sexual behavior in male rats and some underlying mechanisms	Faible pertinence : exposition trop éloignée de celles des riverains d'éoliennes
Ziaran	2013	Potential health effects of standing waves generated by low frequency noise	Non exploitable : le document n'est pas un article source (revue)

Annexe 4 : Descripteurs et indices acoustiques usuels

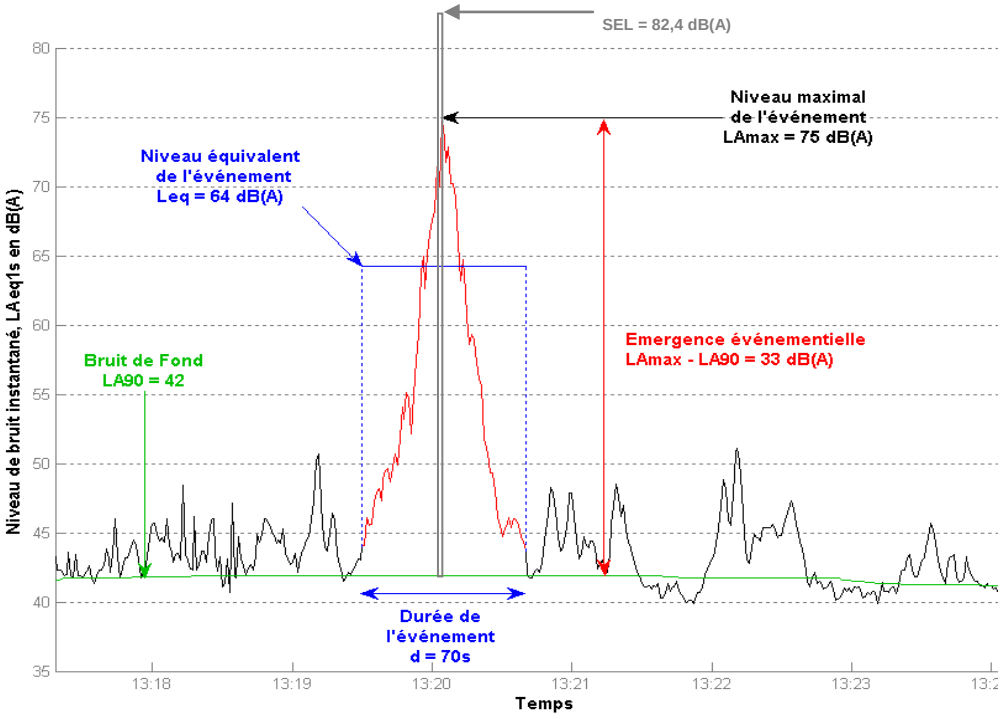
Les indices acoustiques quantifient une émission sonore. Ils sont régulièrement utilisés en normalisation[87] sur le sujet. Les indices acoustiques peuvent être classés en deux grandes familles, ils peuvent être :

- de type événementiel ;
- de type intégré (moyenne énergétique).

Il existe un grand nombre d'indices acoustiques. Seuls les principaux, ceux le plus souvent utilisés dans le cadre d'études épidémiologiques ou expérimentales sur les effets sanitaires extra-auditifs du bruit sont présentés ci-après.

▶ Les indices acoustiques événementiels

Les indices acoustiques événementiels s'intéressent aux pics de bruit. Un pic de bruit correspond à une augmentation rapide suivie d'une diminution rapide du niveau de bruit. Il traduit l'émergence d'un bruit particulier par rapport au bruit de fond.



Source : Bruitparif

Figure 1 : Exemple de caractéristiques acoustiques associées à un pic de bruit (ici passage d'aéronef)

LA_{max} *(maximum sound Level)*

Le LA_{max} correspond à la valeur maximale du niveau de pression acoustique pondérée par une

[87] Le lecteur se rapportera utilement aux documents de référence suivants :

- Norme NF EN 61672-1 : 2003 « Electroacoustique. Sonomètres. Partie 1 : spécifications » ;
- Norme NF S 31-110 : 2005 « Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement » ;
- Norme NF S 31-010 : 1996 « Caractérisation et mesurage du bruit dans l'environnement ».

courbe de type « A »[88], exprimé en décibel pondéré A (dBA), déterminé sur un intervalle de temps T en utilisant la pondération temporelle « rapide » (*fast*) (norme AFNOR NF S 31-110, 2005), c'est-à-dire sur une durée de 125 ms.

Cet indice représente le niveau maximum atteint lors des pics de bruit et permet la prise en compte de crêtes de bruit élevées. Il est facile à mesurer et aisément compréhensible. Il paraît relativement bien adapté pour décrire la gêne événementielle et est très utilisé dans les recherches sur les perturbations du sommeil par le bruit. Il est utilisé en particulier dans les procédures homologatives d'émission acoustique des véhicules (norme ISO 362).

Cependant, les diverses normes citées en référence n'utilisent pas toujours ce seul et unique indice, ceci même lorsqu'il s'agit de sources de bruit identiques. De plus, cet indice ne retient que le niveau maximum du bruit perçu pendant une durée très courte, ce qui ne permet pas d'avoir une idée de l'exposition globale au bruit.

Le LA_{max} est utilisé en particulier dans les procédures normalisées touchant aux domaines routier et ferroviaire. Le niveau équivalent « court » LA_{eq} (1 s) est utilisé en complément du LA_{max} dans les procédures normalisées touchant les autres domaines (transport aérien et industrie) (voir ci-après les indices acoustiques intégrés).

L_{AE} ou SEL (*Sound Exposure Level*)

Le L_{AE} ou SEL correspond au niveau de pression acoustique pondéré A (dBA) d'un son fictif qui, maintenu constant pendant 1 seconde, aurait la même énergie acoustique que l'événement considéré. Il est souvent désigné par SEL (NF S 31-110, 2005).

Sa traduction mathématique est donnée par la relation suivante :

$$L_{AE} = LA_{eq,événement} \quad + \quad 10\log(durée\ de\ l'événement)$$

où $LA_{eq,événement}$ = niveau de pression acoustique continu équivalent (voir ci-après les indices acoustiques intégrés).

Le L_{AE} permet de représenter l'énergie d'un pic de bruit en tenant compte de la durée, ce qui facilite les comparaisons entre deux événements de durées différentes.

En revanche, le L_{AE} ne représente pas une valeur physique directement mesurable, au sens où sa valeur est supérieure au LA_{max}, ce qui peut poser problème en matière de communication et de compréhension.

NA_x (*Noise events Above* x dBA)

Le NA_x représente le nombre d'événements (passages de trains, survols, etc.) dépassant un seuil de bruit fixé. Cet indice est facile à comprendre et paraît relativement bien adapté pour décrire la gêne liée à de nombreux pics de bruit.

Toutefois, l'utilisation de cet indice nécessite de bien identifier les contributions respectives de chacune des sources en présence. Par exemple, les indices NA_{62} et NA_{65} correspondent respectivement au nombre d'événements de type aéroportuaire dont le niveau maximal LA_{max} dépasse 62 dBA et 65 dBA. L'indice NA_{70}, principalement utilisé en Australie, est de plus en plus utilisé ailleurs dans le monde, car il prend en compte la gêne dont parlent les résidents en fonction de la fréquence des survols.

TA_x (Time above x dBA)

Le TA_x représente le pourcentage (%) de temps pendant lequel le niveau de bruit dépasse un seuil

[88] La pondération de type A tient compte de façon sommaire de la perception des sons par l'oreille humaine, en diminuant le poids des basses fréquences par rapport aux fréquences moyennes et hautes.

fixé. En revanche, il ne reflète pas l'exposition globale au bruit. De plus, comme pour le NA_x, il est nécessaire de bien identifier les contributions respectives de chacune des sources en présence.

Émergence événementielle

L'émergence événementielle correspond à la différence entre le niveau LA_{max} et le niveau de bruit de fond (BGN pour *Background noise*) précédant l'événement. Elle est exprimée en dBA et est définie par la relation suivante (voir normes (NF S 31-190, 2008) et (ISO 20-906, 2009) pour le domaine aérien) :

$$Emergence\ événementielle = L_{A\max} - BGN$$

Cet indice permet le dénombrement des pics de bruit par classe d'émergence. Il est aisément compréhensible.

- **Les indices acoustiques intégrés**

Les indices acoustiques intégrés s'intéressent à une dose moyenne d'énergie acoustique délivrée pendant une durée donnée.

$L_{eq,T}$ (*equivalent Level*)

Le $L_{eq,T}$ est défini comme étant le niveau de pression acoustique continu équivalent, en décibels (dB), déterminé pour un intervalle de temps T. C'est la valeur moyenne énergétique du bruit fluctuant mesuré sur la durée T (NF S 31-110, 2005).

Le $L_{eq,T}$ est le niveau d'énergie acoustique moyen d'un son continu stable qui, au cours d'une période spécifiée $T = t_2 - t_1$, a la même pression acoustique quadratique moyenne qu'un son considéré dont le niveau varie au cours du temps.

Ce niveau est défini par la relation suivante :

$$L_{eq,T} = 10 \log\left[\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2}\left(\frac{p(t)}{p_o}\right)^2 dt\right]$$

Pour préciser les bornes de l'intervalle de mesurage, le niveau de pression acoustique continu équivalent $L_{eq,T}$ peut être noté $L_{eq}(t_1, t_2)$, par exemple L_{eq}(6 h, 22 h) pour l'intervalle de temps [6 h, 22 h].

Les intervalles de mesurage sont en général définis dans des normes ou des textes réglementaires, on parle alors d'intervalles de référence. La Directive européenne 2002/49/CE sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement donne les intervalles de référence suivants en Europe : [6 h, 18 h] (jour ou *day*, L_d), [18 h, 22 h] (soir ou *evening*, L_e) et [22 h, 6 h] (nuit ou *night*, L_n). En France, pour les infrastructures routières, on utilise les intervalles de référence [6 h, 22 h] (jour ou *day*, L_d) et [22 h, 6 h] (nuit ou *night*, L_n). Concernant les bruits ferroviaires, l'intervalle de référence correspond en général au temps de passage du train concerné (qui dépend de sa vitesse et de sa longueur).

Cet indice caractérise bien la « dose » (en termes d'énergie acoustique) de bruit reçue pendant une période donnée T. Toutefois, cet indice est toujours associé à la durée de la période de mesure et ne permet pas de comparer des pics de bruit de durées différentes et présente le défaut important de ne pas fournir d'information, dans le cas de bruits fluctuants, sur la dynamique réelle. Ceci est illustré sur la figure suivante, où sont représentés l'évolution sur 30 minutes des niveaux de bruit au droit d'un feu tricolore et le niveau équivalent calculé sur la même période.

La pression acoustique peut éventuellement être pondérée en fréquence par la pondération A. Le niveau continu équivalent est alors noté $LA_{eq,T}$.

L_{den} (day-evening-night assessment sound Level)

Le L_{den} est un niveau composite d'évaluation du niveau sonore sur 24 h (jour-soir-nuit), exprimé en décibels pondérés A (dBA). Il est évalué sur une période suffisamment longue pour être représentatif de la variabilité de l'émission sonore et des conditions de propagation (exemple : une année dans le cadre des cartes stratégiques de bruit préconisées par la Directive européenne 2002/49/CE). Il désigne le niveau sonore continu équivalent composé de la moyenne énergétique des niveaux sonores continus équivalents mesurés sur trois intervalles de référence de jour, de soirée et de nuit, auxquels sont appliqués des termes correctifs majorants, avec des pénalisations différentes selon l'heure.

Sa traduction mathématique est donnée par la relation suivante :

$$L_{den} = 10 \log \left[\frac{12}{24} \times 10^{\frac{L_d}{10}} + \frac{4}{24} \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + \frac{8}{24} \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right]$$

où[89] :

L_d = niveau sonore de jour (de 6 h à 18 h, pondéré A) ;

L_e = niveau sonore en soirée (de 18 h à 22 h, pondéré A) (auquel est appliqué une correction de 5 dB, c'est-à-dire que les niveaux mesurés en soirée sont augmentés de 5 dBA) ;

L_n = niveau sonore de nuit (de 22 h à 6 h, pondéré A) (auquel est appliqué une correction de 10 dB, c'est-à-dire que les niveaux mesurés de nuit sont augmentés de 10 dBA).

Le L_{den} est l'un des principaux indices produits par les techniques classiques de modélisation. Grâce aux pénalisations qui lui sont appliquées en fonction des trois intervalles de référence, il peut prendre en compte un critère de gêne différent selon la période de la journée.

Toutefois, le L_{den} représente imparfaitement la gêne occasionnée par des bruits non continus (avions, trains, véhicules au démarrage, passage de véhicules particulièrement bruyants, etc.).

La Directive européenne 2002/49/CE rend obligatoire l'utilisation du L_{den} et du L_n tout en laissant le champ ouvert à l'utilisation d'autres indices. Les valeurs limites prises par la France en application de cette Directive sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 36 : valeurs limites en France* après transposition de la Directive 2002/49/CE

Indicateur	Aérodromes	Route et/ou LGV	Voie ferrée conventionnelle	Activités industrielles
L_{den} (dBA)	55	68	73	71
L_n (dBA)	-	62	65	60

* Il s'agit de niveaux sonores évalués en façade de bâtiment sans prise en compte de la dernière réflexion pour les bruits de transport terrestre, en champ libre pour les bruits d'aéronefs.

L'avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) du 6 mai 2004 relatif à la protection des personnes exposées au bruit des avions recommande pour évaluer et gérer la gêne liée au bruit des infrastructures aéroportuaires, d'utiliser l'indice L_{den} et de ne pas dépasser, en façade des habitations, un niveau L_{den} de 60 dB(A), toutes sources confondues. La valeur limite

[89] Remarque : L_d, L_e et L_n équivalent respectivement à [L_{Aeq} (6 h - 18 h) – 3 dB], [L_{Aeq} (18 h – 22 h) – 3 dB], et [L_{Aeq} (22 h – 6 h) – 3 dB] car, contrairement au L_{Aeq}, L_d, L_e et L_n ne tiennent pas compte de la réflexion en façade (d'où la correction de – 3 dB).

L_{den} de 55 dBA indiquée dans le Tableau 36 correspond à la limite en France mesurée en champ libre.

L_{dn} ou DNL (*day-night Level*)

Le L_{dn} *(day-night level)* est un descripteur de bruit basé sur le niveau énergétique équivalent sur une journée complète (jour/nuit), auquel une pénalité de 10 dBA a été introduite pour la période de nuit (les niveaux mesurés de nuit sont augmentés de 10 dBA).

Les heures correspondant au jour (*day*) et à la nuit (*night*) doivent être précisées dans la définition : par exemple, 6 h – 22 h pour le jour et 22 h – 6 h pour la nuit.

Dans la pratique cet indice n'est plus beaucoup utilisé en Europe depuis l'apparition du L_{den} qui prend en compte la période de soirée.

LA_X (*sound Level exceeded for X % of the time*)

Les indices fractiles ou « Niveaux acoustiques fractiles » symbolisés L_{AX} représentent un niveau de pression acoustique pondéré A qui est dépassé pendant X % de l'intervalle de temps considéré. Ce type d'indice est obtenu par l'analyse statistique de l'évolution des LA_{eq} *(niveau de pression acoustique continu équivalent)* (NF S 31-110, 2005). Dans la pratique, trois indices fractiles sont souvent utilisés :

- LA_{10} : niveau acoustique équivalent dépassé pendant 10 % du temps d'analyse. Il donne une indication du niveau dépassé le plus rarement (caractérisation des émergences) ;
- LA_{50} : niveau acoustique équivalent dépassé pendant 50 % du temps d'analyse. Il existe la relation suivante entre le LA_{eq} et le LA_{50} $L_{Aeq} = L_{A50} + 0.115\sigma^2$

  Où σ est l'écart-type de la distribution des niveaux sonores sur la période;
- LA_{90} : niveau acoustique équivalent dépassé pendant 90 % du temps d'analyse. Il donne une indication du niveau dépassé la plupart du temps (caractérisation du bruit de fond).

L_R (norme DIN EN 60651)

L'indicateur L_R est défini par la formule :

$$L_r = 10 \cdot \lg\left[\frac{1}{T_r}\sum_{j=1}^{N} T_j \cdot 10^{0,1\left(L_{Aeq,j} - C_{met} + K_{T,j} + K_{I,j} + K_{R,j}\right)}\right]$$

Tr= somme (j=1 à N de Tj) = 16 h (jour) ou 1 h ou 8 h (nuit)

Tj : durée de la période partielle j

N : nombre de périodes partielles

LAeq,j : niveau sonore moyen pendant la période j

Cmet : correction météorologique (voir norme DIN ISO 9613-2:1997, équation 6)

KT,j : majoration pour les sons purs et l'intelligibilité dans la période Tj

KI,j : majoration pour les sons impulsionnels et dans la période Tj

KR,j : majoration pour le jour avec une sensibilité élevée dans la période Tj.

▶ Les indices acoustiques intégrés

En complément des pondérations fréquentielles, les appareils de mesure, comme les sonomètres, proposent des pondérations temporelles. Quatre types de pondération sont définis, en fonction de la constante de temps T d'intégration (seules les deux premières pondérations suivantes sont

désormais définies dans la norme NF EN 61672-1) :

- la pondération **S** (pour *slow*, lente) qui moyenne les sons sur une durée de τ = 1 s, utilisée largement dans la mesure du bruit dans l'environnement ;
- la pondération **F** (pour *fast*, rapide) qui réalise un moyennage sur un temps plus court, à savoir τ = 125 ms ;
- la pondération **I** (pour *impulse*, impulsionnelle) qui moyenne les sons sur lesτ□35 ms de la partie montante du signal, et sur les τ = 1,5 s à partie descendante. Cette pondération était principalement utilisée pour caractériser les impulsions sonores, mais est quasiment abandonnée faute de corrélation suffisante avec le caractère impulsif du bruit ;
- la pondération **P** (pour *peak* ou *hold*, pic) caractérisant les impulsions plus courtes (inférieures à 100 ms) et très intense. En réalité, il ne s'agit pas d'une pondération mais du maintien du niveau sonore du pic en question au niveau de l'affichage des appareils de mesure.

En pratique, la pondération temporelle consiste à calculer la pression efficace en considérant la constante d'intégration τ comme temps d'observation T_o :

$$p_{eff} = \left[\frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} p^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

De toutes les pondérations présentées ci-dessus, les pondérations temporelles F et S, sont les plus utilisées en acoustique de l'environnement.

Annexe 5 : Psychoacoustique appliquée au bruit des éoliennes

Introduction

Dans le but d'estimer correctement la gêne sonore liée au bruit des éoliennes, il est essentiel de disposer d'un paramètre qui soit proportionnel à cette gêne. Dans le cas contraire, l'évaluation de ces impacts pourraient être amenés à être fortement sous-estimés.

L'indice physique du niveau de pression sonore a été conçu pour évaluer les pertes auditives liées au bruit. Son utilisation pour l'évaluation de la gêne sonore pour les bruits de basses fréquences a été largement critiquée (Persson Waye *et al.* 2001).

L'analyse spectrale vise quant à elle à reproduire la résolution fréquentielle de l'oreille humaine (lorsque la fréquence est doublée, la résolution diminue de moitié). Ce descripteur n'a pas été spécifiquement conçu pour l'évaluation de la gêne. Au regard des descriptions du bruit des éoliennes par les riverains, la variation temporelle du signal semble cruciale (voir (Pedersen et Persson Waye 2004)). La variation temporelle n'est pas identifiable dans les spectrres de tiers d'octave (Figure 85 de l'Annexe 6).

Tableau 37 : occurrence des qualificatifs du bruit éolien dans les descriptions qualitatives (d'après (Pedersen et Persson Waye 2004))

Descripteurs qualitatifs	Occurence
Bruissement (« *swish* »)	0,72
Sifflement (« *whistle* »)	0,64
Vibration / pulsation (« *pulsating/throbbing* »)	0,45
Résonance (« *resounding* »)	0,48
Frottements (« *scratching* »)	0,40
Tonal (« *tonal* »)	0,34
Basses fréquences (« *low frequency* »)	0,20
clapotis (« *lapping* »)	0,26

Pour les éoliennes, deux facteurs semblent avoir une influence importante sur la gêne sonore : le contenu basses-fréquences du signal et sa modulation d'amplitude (Pedersen et Persson Waye 2004). L'importance de ces facteurs peut s'expliquer par une approche psychoacoustique du bruit. Le concept de base est la sonie, ou bruyance. Bien que l'intensité sonore constitue un facteur clairement dominant pour la gêne, d'autres paramètres sonores peuvent également accroitre les niveaux (Davies 2003, McGuire 2008).

Généralités en psychoacoustique

Sonie (*loudness*)

L'intensité sonore constitue un concept de base en psychoacoustique. La norme internationale ISO 226 définit des combinaisons de niveaux de pression acoustique et de fréquences de tons purs continus pour lesquelles les intensités de sensation sont perçues comme équivalentes par

des auditeurs otologiquement normaux d'âges compris entre 18 et 25 ans pour une écoute binaurale.

Ce modèle d'isosonie de l'ISO 226 n'est cependant valide que pour des sons purs. Ce concept a été étendu à l'ensemble des bruits à large bande, l'ISO 352 proposant 2 méthodes standardisées de calcul. Pour la première (méthode A, développée par Stevens et Mark), le principe consiste à comparer la sonie du bruit étudié à celle d'un bruit critique à 1 kHz.

La seconde méthode d'évaluation de la sonie, dite méthode de Zwicker (ISO 532 Method B) peut s'appliquer à des bruits complexes réalistes composés de mélanges de sons purs et diffus. Zwicker a divisé le spectre de fréquences audibles en 24 bandes de fréquences critiques (échelle de Bark) en se basant sur des études expérimentales.

Qualité sonore (*sound quality*)

Le paragraphe précédent a montré que les mesures de la bruyance, ou sonie, ne dépendent que du contenu spectral du bruit. Ce chapitre va présenter les facteurs intervenant dans la perception sonore.

▶ Acuité (*sharpness*)

La netteté sonore permet de caractériser le bruit comme brillant (« *shrill* ») ou sourd (« *dull* ») et s'avère être un élément de perception pertinent pour juger du caractère agréable du bruit. L'unité pour décrire la sensation d'acuité est l'acum. Un bruit d'un acum correspond à l'acuité d'un bruit à bande étroite (largeur de bande 1 bark) de fréquence centrée sur 1 kHz à un niveau de 60 dB.

▶ Rugosité (*roughness*)

La rugosité est un autre paramètre psychoacoustique utilisé en ingéniérie de la qualité sonore, par exemple pour déterminer les caractéristiques de « sportivité » du bruit moteur d'une automobile. Il est gouverné par les variations temporelles du son et atteint un maximum pour une fréquence de modulation de 70 Hz.

▶ Force de fluctuation (*fluctuation strength*)

La force de fluctuation est un paramètre similaire à celui de la rugosité, celui-ci atteint cependant un maximum pour une fréquence de modulation d'environ 4 Hz. Comme montré dans la Figure 79, les données d'entrée nécessaires pour calculer la force de fluctuation sont identiques à celles utilisée pour la rugosité :

- f_{mod}, la fréquence de modulation
- m, la profondeur de modulation
- ΔL la profondeur du masquage temporal

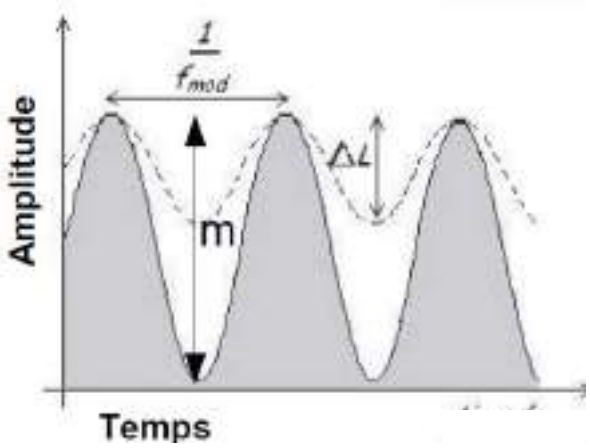


Figure 79 : illustration de la force de fluctuation

La force de fluctuation, *F*, se calcule de la manière suivante :

$$F = \frac{\Delta L}{(f_{\mathrm{mod}} / 4Hz) + (4Hz / f_{\mathrm{mod}})}$$

La force de fluctuation joue un rôle crucial dans l'interférence avec le langage humain, cela pour la raison suivante : la fluctuation de l'enveloppe du signal du langage courant montre également un maximum pour une fréquence de modulation d'environ 4 Hz. Cela correspond à peu près au nombre de syllabes prononcées par secondes. Comme on pourrait s'y attendre, l'organe de langage humain produit des signaux de communication dont la fluctuation d'enveloppe correspondant à la vitesse à laquelle le système auditif humain est le plus sensible.

- **Tonalité (« *tonality* »)**

La tonalité consiste à évaluer la présence ou non d'une proéminence tonale dans le spectre d'un bruit. Une contribution tonale à environ 700 Hz engendre le maximum d'impression de tonalité (Aures 1985). La tonalité est modélisée comme une fonction dépendante de la fréquence. Les bruits à bande passante étroite peuvent également être perçus comme tonaux. Plus la bande passante est faible, plus le bruit semble tonale.

Bruyance et gêne

La norme ISO 352 prévoit que la bruyance des sons de basses fréquences augmente plus rapidement que celui des sons purs (ISO 226). Aussi la gëne augmente plus rapidement avec le niveau sonore dans le domaine des basses fréquences que dans celui des moyennes et hautes fréquences (voir Figure 80). Le niveau sonore pondéré A est peu utile pour l'évaluation de la gêne liée aux bruits de basses fréquences (Waye *et al.* 2001). La bruyance augmente plus rapidement dans le domaine des basses fréquences que dans ceux des moyennes et hautes fréquences (voir Figure 80).

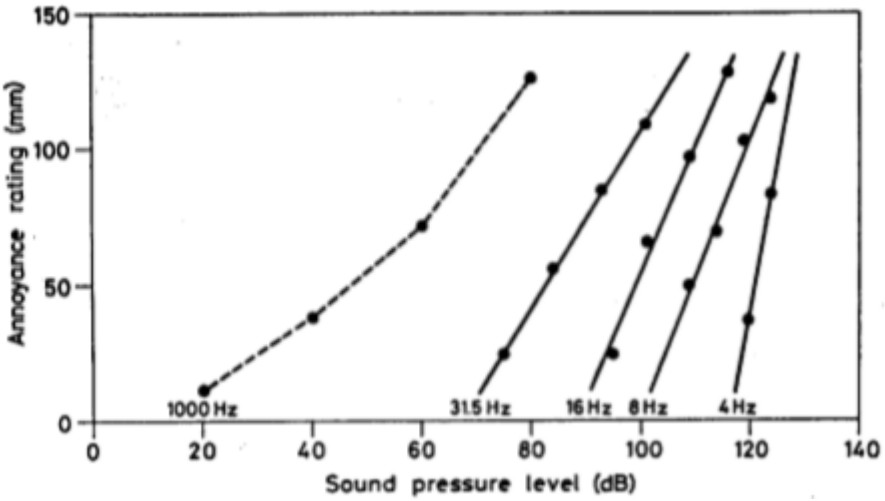


Figure 80 : niveaux de gene en fonction du niveau de pression acoustique et de la fréquence du bruit (Møller et Lydolf 2002)

Pedersen et Larsen (Pedersen, Hallberg, et Persson Waye 2007) ont utilisé dans leur étude un modèle (Figure 81) permettant de calculer les contributions à la gêne de l'impact visuel et de l'attitude face à la source. Ces contributions se sont avérées, pour plusieurs environnements différents, bien plus importants que les niveaux d'exposition sonore en dBA. Or, pour le cas de la gêne liée au trafic aérien, Babish *et al.* ont conclu que le niveau de bruit en dBA est un meilleur indicateur d'effet pour l'hypertension comparé à la gêne sonore auto-évaluéen (Babisch *et al.* 2013).

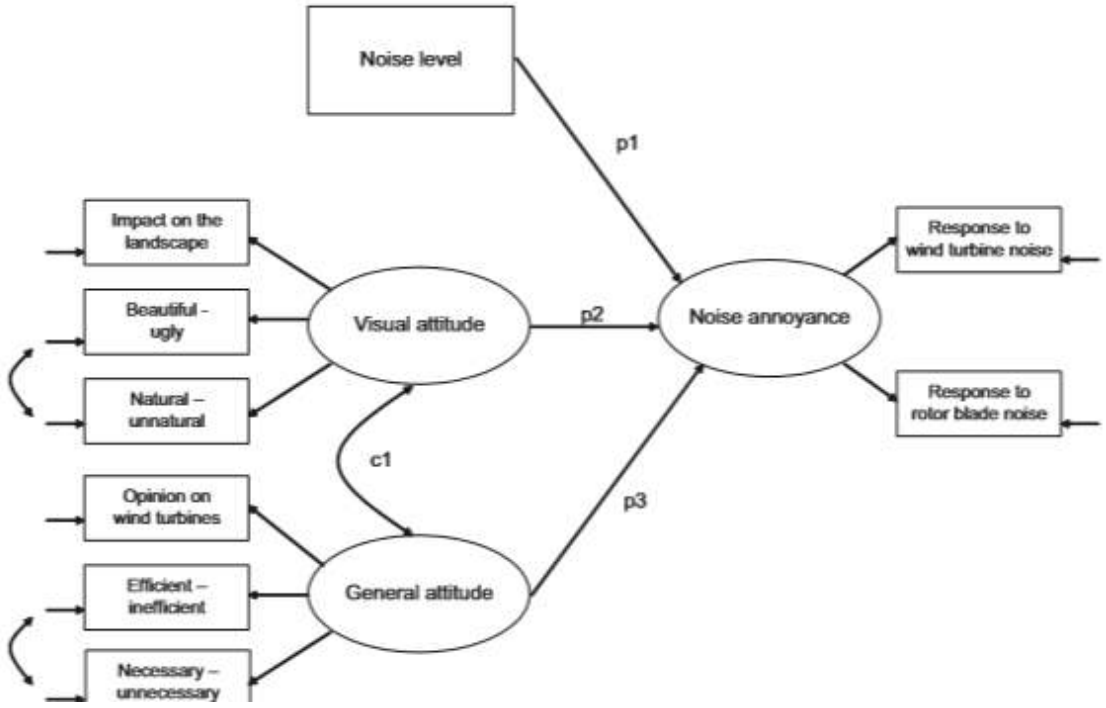


Figure 81 : impact des niveaux de bruit pondérés A, de l'attitude visuelle et générale pour la gêne sonore (Pedersen et Persson Waye 2007)

L'hypothèse d'une gêne sonore dominée par une composante basse fréquence repose sur les résultats de Pedersen (Pedersen *et al.* 2010). Selon cette étude, le bruit du trafic routier pourrait masquer le bruit des éoliennes à des niveaux intermédiaires (35-40 dBA) lorsque le bruit généré par le trafic routier est nettement supérieur (au moins 20 dB au dessus). Le bruit routier s'assimilant à un bruit de basses fréquences, cela laisse suggérer que seules les composantes hautes fréquences des éoliennes demeurent audibles. Ce phénomène pourrait impliquer un masquage de signal (modèle de Zwicker). Une autre explication est plausible : les sources d'émission des bruits de basses fréquences (trafic routier, éoliennes) serait compliquées à distinguer à l'écoute.

Mesures de la gêne en fonction de la qualité sonore

Des méthodes combinant des paramètres psychoacoustiques ont montré qu'elles pouvaient être utilisées avec succès pour prédire la gêne sonore à partir d'émissions ou immissions sonores (Fastl 2005). La méthode de Zwicker (Fastl 2005) utilise la bruyance, l'acuité, la rugosité et la force de force de fluctiation d'une facon complexe pour estimer la gêne. La méthode de Milošević *et a*l utilise les paramètres aussi d'une facon complexe.

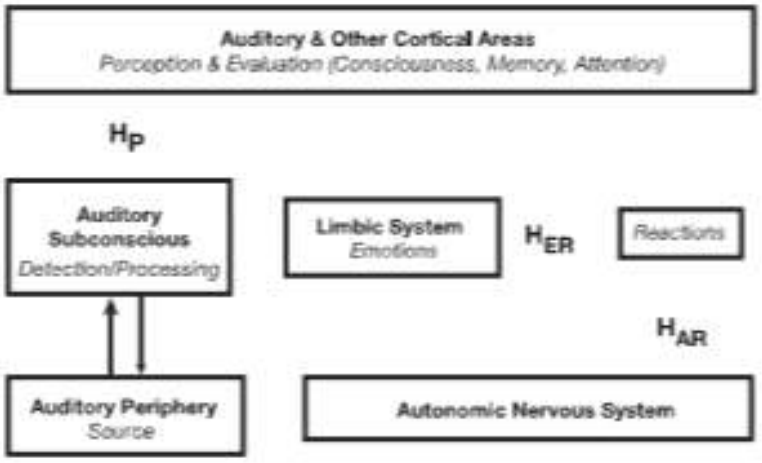
Aucune de ces méthodes n'évalue de manière parfaite la gêne sonore. Ellemeier *et al*. ont étudié l'influence des paramètres de qualité sonore (rugosité, acuité, etc.) sur la gêne sonore pour 2 signaux de bruyance identique mais dont la source est clairement identifiable pour l'un et non pour l'autre (Ellermeier, Eigenstetter, et Zimmer 2001). Bien que la gêne puisse être prédite de manière satisfaisante à partir de ces paramètres de qualité sonore, les auteurs ont constaté qu'ils ne pouvaient pas en prédire les évolutions liées à de faibles modifications du signal Schomer *et al*. ont quant à eux comparé 2 méthodes entre elles : les courbes d'exposition sonores pondérés par niveau de bruyance (courbes ISO 226) et la méthode de Zwicker (Schomer, Suzuki, et Saito 2001). Si de meilleurs résultats ont été obtenus à l'aide de la méthode ISO 226 pour traiter de bruits de détonation, aucune différence significative n'a pu être constatée pour des sources sonores environnementales plus classiques. Ces résultats posent la question, non résolue, de l'application de ces méthodes aux sources sonores que sont les éoliennes, celles-ci comprenant des composantes sonores clairement identifiables.

Effets de sources sonores combinées sur la gêne

Les bruits ambiants constituent une quantité de données trop volumineuse pour être analysée dans leur intégralité par le cerveau. Ce processus de traitement est effectué par le cortex auditif. Lorsque le signal devient familier, il n'y a plus besoin de le traiter. C'est ce que l'on appelle l'habituation.

L'habituation est définie comme la diminution progressive et la disparition d'une réponse normalement provoquée par un stimulus lorsque ce dernier est répété sans être suivi de renforcement[90]. Cette réaction est nécessaire car le cerveau dispose de capacités limitées pour les tâches multiples. (Jastreboff et Jastreboff 2004). À l'inverse, si ce stimulus est évalué comme réclammant une attention particulière, le système nerveux autonome est alors activé (réaction de lutte ou de fuite).

[90] « disappearance to a reaction to a neutral stimulus due to its repetitive appearance without reinforcement »



d'après(Jastreboff et Jastreboff 2004)

Figure 82 : habituation du système nerveux autonome (Har) et émotionnel

Le système limbique, considéré comme le centre des émotions dans le cerveau, est l'un des organes centraux de ce post-traitement. D'autres sens, tels que la vision, interviennent également dans ce système, raison pour laquelle des effets combinant facteurs d'attitudes face à la source, signal visuel et bruit sont possibles. Le Tableau 38 indique que le type d'attitude face à la source module positivement ou négativement la gêne sonore.

Tableau 38 : types d'attitudes personnelles face à la source sonore et sens de l'influence sur la gêne ressentie (d'après (McGuire 2008))

Variable	Sens de modification de la gêne	Description
Peur	Augmentation	Peur de la source sonore
Capacité à surmonter le bruit	Diminution	Habilité à s'adapter à la source
Préventabilité	Augmentation	Conviction qu'il est possible de prévenir les niveaux sonores
Conviction que la source est nuisible à la santé	Augmentation	Conviction que le bruit induit des effets sur sa propre santé
Gêne générale de la source	Augmentation	Gêne liée à la suorce en plus de celle strictement liée au bruit qu'elle produit
Sensibilité au bruit	Augmentation	Sensibilité au bruit de manière générale
Bénéfice personnel	Diminution	Ex : utilisation fréquente d'une autoroute ou route
Reconnaissance	Diminution	Conviction que les autorités compétentes

Le mécanisme d'habituation revêt donc une importance capitale dans l'appréciation de la gêne sonore. Il est considéré comme un paramètre indépendant de la sensibilité au bruit autodéclarée (Smith 2003). Il est cependant modulé par le niveau sonore (l'augmentation de celui-ci diminue la probabilité d'habituation) et possiblement par l'attitude face à la source et l'aspect visuel de la source.

Annexe 6 : Paramètres psychoacoustiques du bruit éolien

Six échantillons des mesures de bruit de 2 minutes issus de la campagne de mesures ont été étudiés dans le cadre de cette analyse (voir Tableau 39).

Tableau 39 : échantillons sonores utilisés dans le cadre de l'évaluation des paramètres psychoacoustiques

Parc éolien	Période	Distance à l'éolienne (m)	Vitesse du vent à 10 m (m/s)
Porcien	24-03-2016_02h00	150	5,6
Porcien	24-03-2016_02h00	500	5,6
Porcien	25-03-2016_19h40	150	4,5
Porcien	25-03-2016_19h40	500	4,5
Porcien	26-03-2016_23h00	150	4,9
Porcien	26-03-2016_23h00	500	4,9

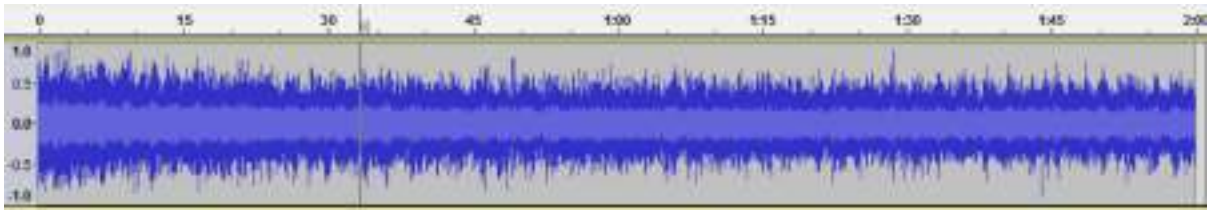
- **Analyse de la modulation d'amplitude**

Les données ont été étudiées à l'aide du logiciel Audacity 2.2.1. Lorsqu'une modulation d'amplitude est identifiée, la courbe enveloppe est calculée à l'aide de la transformée de Hilbert des 30 premières secondes. Cette courbe est ensuite lissée à l'aide d'un filtre median et la fréquence de modulation d'amplitude obtenue par le pic du spctre de puissance de l'enveloppe.

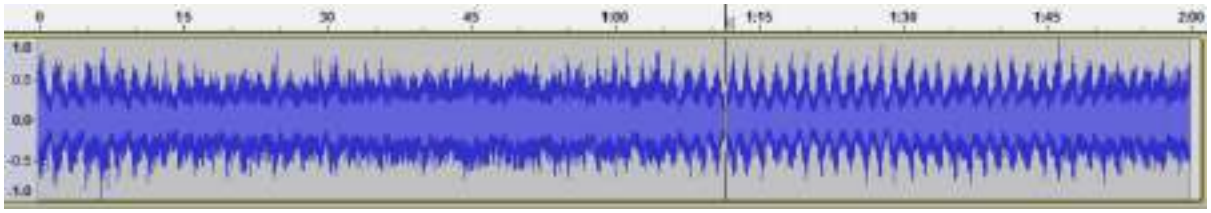
À la distance de 150 m et pour la vitesse de vent la plus élevée (5,6 m/s), une modulation d'amplitude très basse a pu être entendue (voir Figure 83a : bruit semblable à un bruit mécanique, affectant essentiellement les hautes fréquences sonores). Pour un vent de 4,9 m/s, une modulation d'amplitude de 0,7 Hz avec une profondeur de modulation de 50 %, correspondant à la fréquence de passage des pales, a été observée (cf. Figure 83b).

À 500 m de l'éolienne la plus proche, une modulation de 0,7 Hz assez faible (profondeur : 10 %) est observée uniquement pour la vitesse de vent intermédiaire de 4,9 m/s (cf. Figure 84b). Aucune modulation n'est identifiée dans les autres cas.

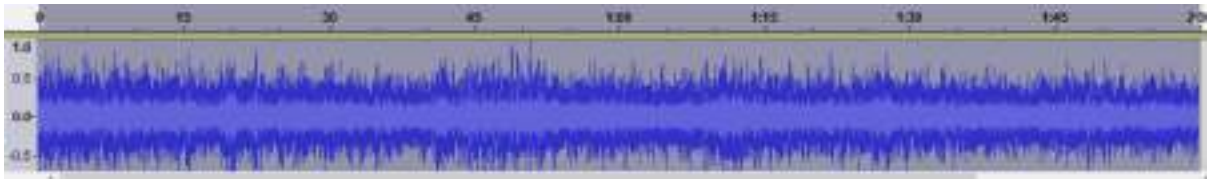
Il est généralement considéré que la fréquence de modulation d'amplitude entraînant le plus de gêne se situe aux alentour de 4 Hz. Celle observée avec ces données expérimentales est de 0,6 Hz.



A) Vitesse de vent : 5,6 m/s, fréquence de modulation : 0,2 Hz (hautes fréquences uniquement)

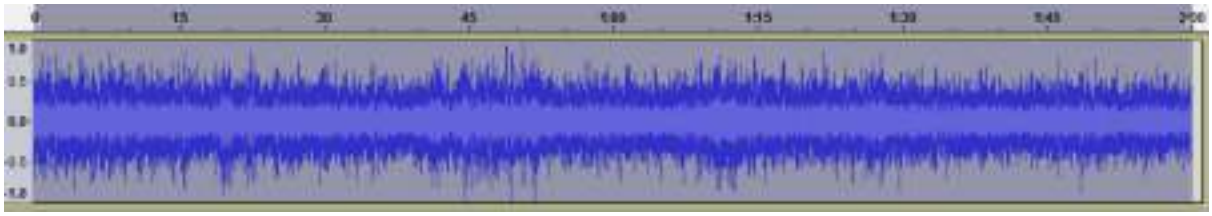


B) Vitesse de vent : 4,9 m/s, fréquence de modulation : 0,7 Hz. Toutes fréquences

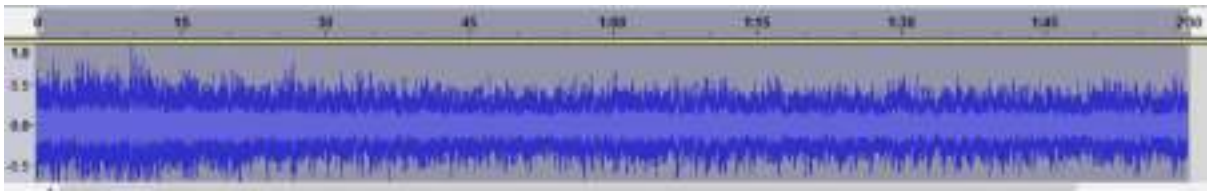


C) Vitesse de vent : 4,7 m/s, pas de modulation d'amplitude observée.

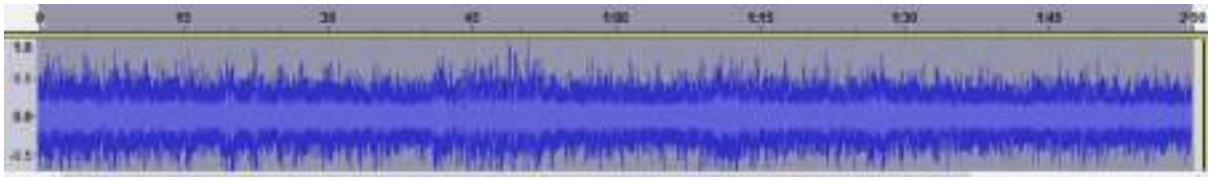
Figure 83 : modulation d'amplitude à 150 m pour le parc éolien du Porcien



A) Vitesse de vent : 5,6 m/s, pas de modulation d'amplitude observée.



B) Vitesse de vent : 4,9 m/s, fréquence de modulation : 0,7 Hz. Toutes fréquences.

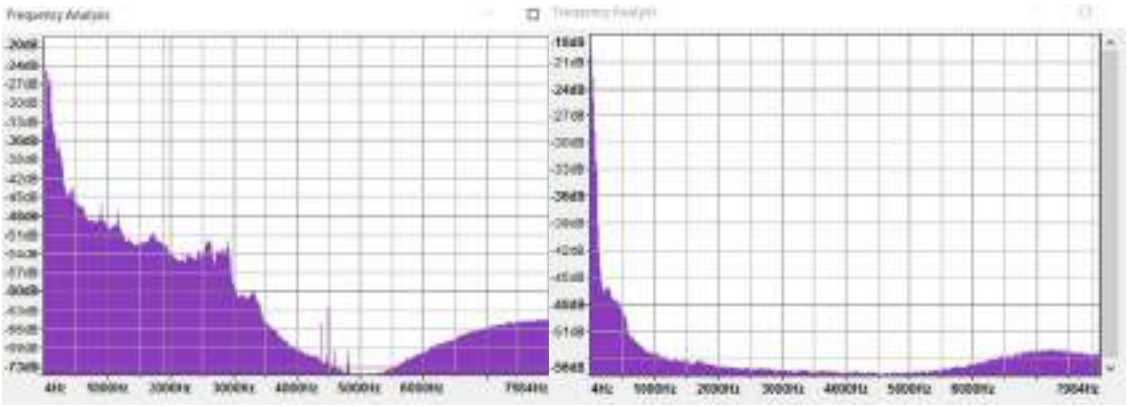


C) Vitesse de vent : 4,7 m/s, pas de modulation d'amplitude observée.

Figure 84 : modulation d'amplitude à 500 m pour le parc éolien du Porcien

- **Paramètres de bruyance, acuité et rugosité**

L'analyse spectrale par transformée de Fourier rapide (FFT) montre un signal particulièrement élevé aux hautes fréquences (au-delà de 6 000 Hz, Figure 85). Ces résultats ne sont pas inhabituels et sont probablement dus au bruit de fond instrumental.



À gauche : période de mesure à 23 :00

À droite : période de mesure à 19 :40

Figure 85 : spectres à 150 m pour le parc éolien du Porcien

L'analyse de la bruyance montre que la contribution des basses fréquences à la bruyance est plus importante que celle des fréquences moyennes à 150 m. À 500 m, le constat est inverse (Figure 86). Une explication plausible à cette observable est que les contributions des autres sources (de fréquences moyennes) que les éoliennes augmentent avec la distance d'éloignement aux éoliennes.

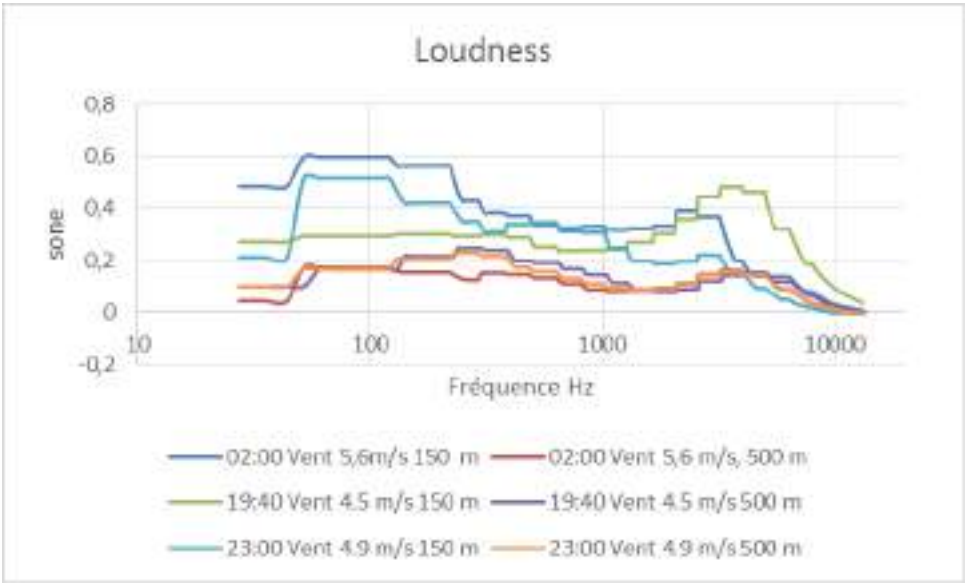


Figure 86 : analyse de la bruyance du signal pour le parc éolien du Porcien

Les paramètres de rugosité et d'acuité sont compares à ceux d'un bruit rose (respectivement, Figure 87 et Figure 88). Ces données semblent indiquer qu'aucun de ces deux paramètres ne constitue un facteur important de qualité du signal, spécifiquement pour la composante basse fréquence du signal. Pour les raisons évoquées plus avant, les résultats pour les fréquences hautes sont peu pertinents.

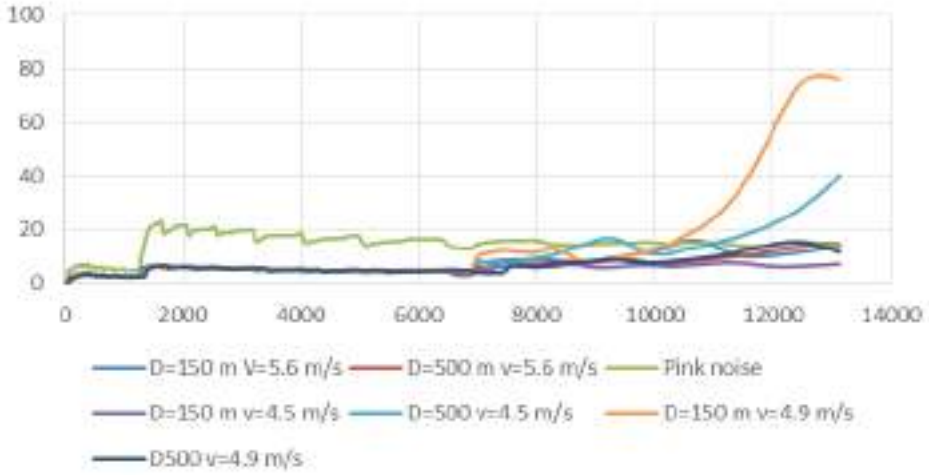


Figure 87 : analyse de la rugosité du signal pour le parc éolien du Porcien

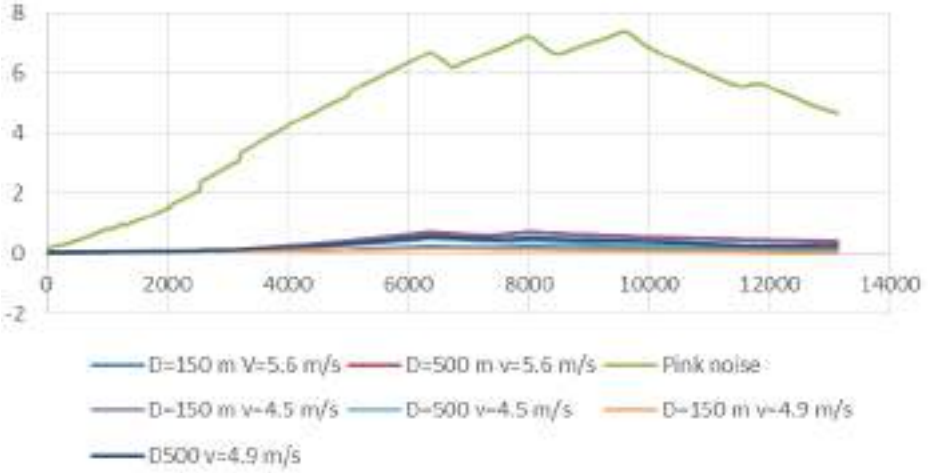


Figure 88 : analyse de l'acuité du signal pour le parc éolien du Porcien

► Conclusion

Les trois courts échantillons étudiés ne permettent pas d'établir de conclusions définitives mais ces données indiquent qu'il y a des points dans la gêne de bruit des éoliennes ou psychoacoustique peut être utile :

1. les basses fréquences semblent jouer un rôle important dans la gêne du bruit audible des éoliennes. Cependant il est important de noter que la psychoacoustique ne permet pas de se prononcer sur la gêne liée aux infrasons de niveaux sonores inaudibles ;
2. la qualité du bruit (paramètres psychoacoustiques) des éoliennes n'indique pas de particularités particulièrement gênant ;
3. la modulation d'amplitude du bruit audible est constatée dans certains échantillons cependant, cet effet n'est pas présent tout le temps. Mais pour être gênant le bruit ne doit pas être présent tout le temps. On estime généralement que la valeur dépassée pendant 10 % de temps décrits bien gêne. (www.epd.gov.hk/epd/noise_education/web/ENG_EPD_HTML/m2/types_3.html). L'étude des échantillons ne permet pas de quantifier cette valeur.

Etant donné que le niveau sonore, mais également la qualité du son (paramètre psychoacoustique) des éoliennes varie en raison du changement de modulation d'amplitude, il est possible que l'habituation au bruit des éoliennes soit plus difficile qu'avec le bruit issu d'autres sources environnementales.

Annexe 7 : Informations complémentaires relatives aux campagnes de mesures

Site 1

Plan de situation

La localisation des capteurs est présentée sur la Figure 89. La topographie est quasi plane avec une faible déclivité entre l'éolienne et le riverain (pente= - 2 %).

Figure 89 : localisation des capteurs

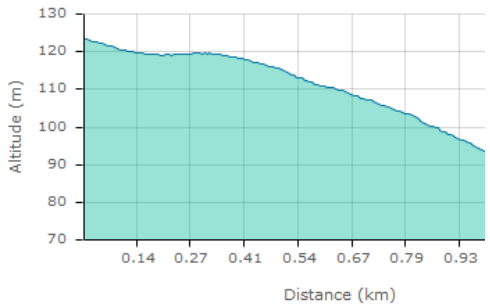


Figure 90 : profil altimétrique entre l'éolienne et le riverain (0 km=position de l'éolienne)

Azimuth de la direction éolienne->riverain : 204°.

Conditions météorologiques

Durant la période d'observation, la vitesse du vent au niveau de la nacelle a varié de 0,4 m/s à 6,8 m/s (Figure 91). La vitesse de vent médiane était de 2,9 m/s et la plus fréquente de 2,2 m/s.

Toutes les directions du vent ont été observées (Figure 91). La direction de vent médiane était de 210° et la plus fréquente de 320°, ce qui correspond à un vent portant transverse entre l'éolienne la plus proche et le riverain.

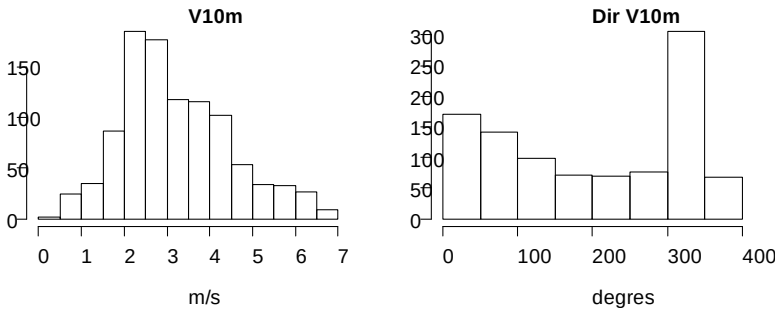
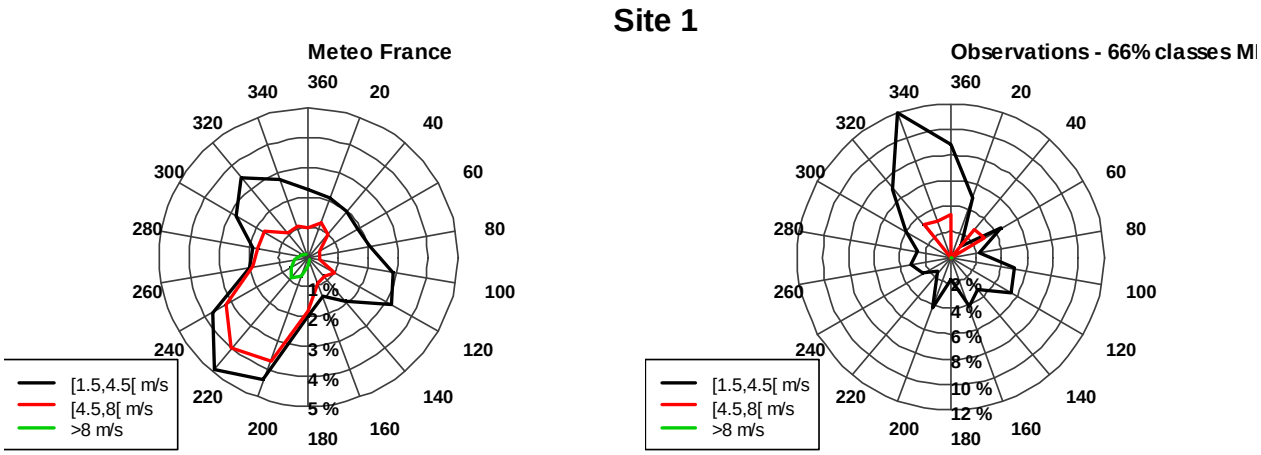


Figure 91 : histogrammes des vitesses et directions du vent durant la période d'observation. Site 1

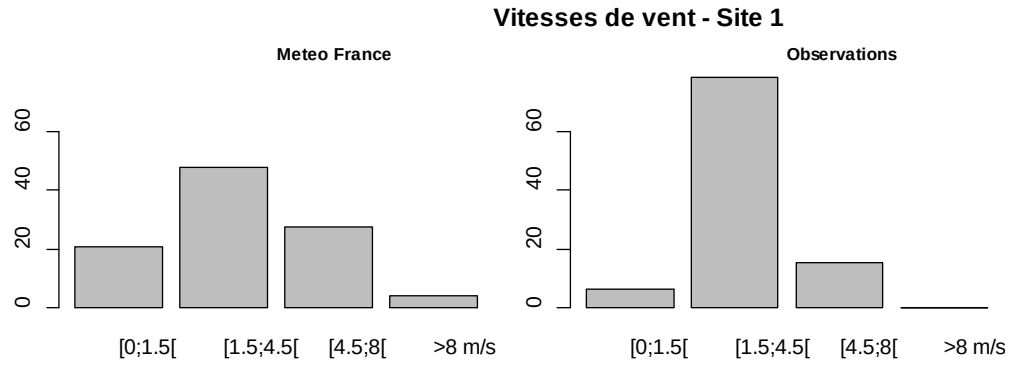
Une comparaison entre la rose des vents moyenne du site de Météo France le plus proche du site de mesure et la rose des vents relevée sur le site lors des mesures indique les conditions de vent observées[91] (classes vitesses/direction) durant la période de mesure correspondent à 66 % des conditions moyennes du site[92] (Figure 92).



Gauche : normales de rose de vent d'audition (source : Météo France – Aulnois sous Laon (02)).

Droite : rose des vents observée durant la période de mesure.

Figure 92 : roses des vents à 10 m de hauteur



Gauche : normales de vitesse de vent (source : Météo France – Aulnois sous Laon (02)).

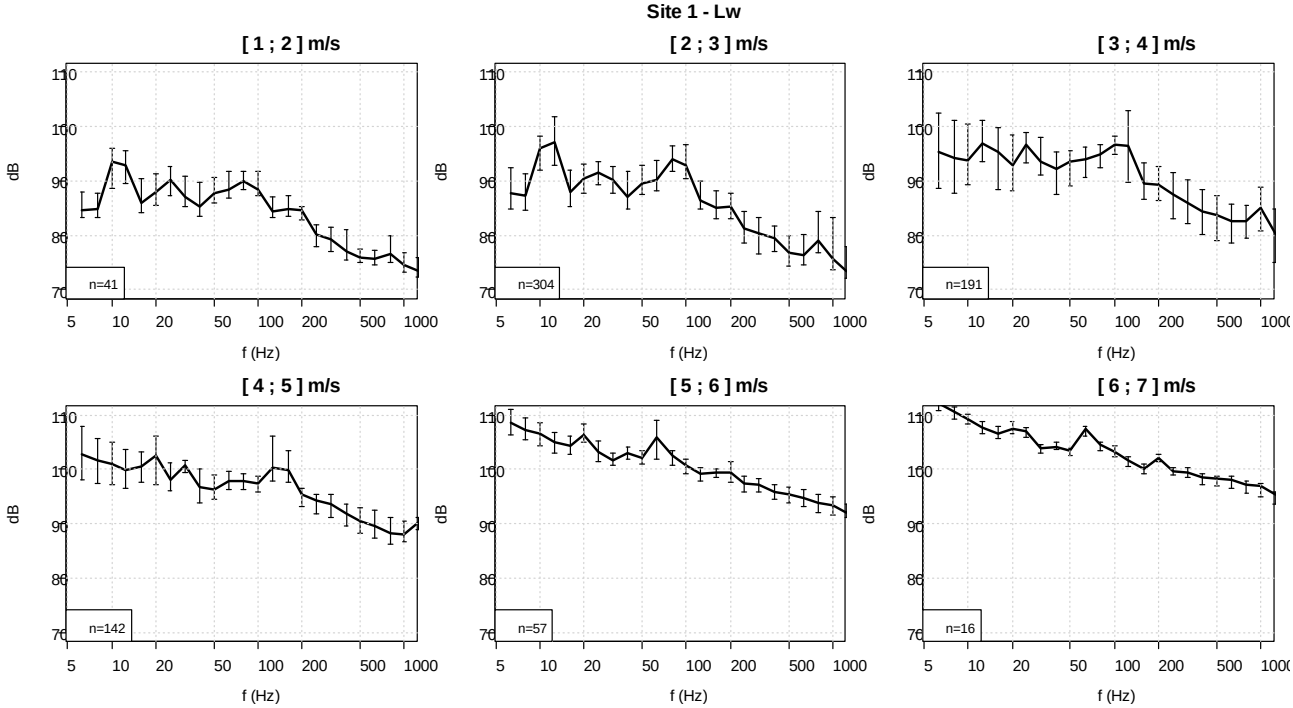
Droite : vitesses de vent observées durant la période de mesure

Figure 93 : histogrammes des vitesses de vent à 10 m de hauteur

[91] Classes vitesses/direction de vent ayant au moins 10 échantillons de 10 min valides.

[92] Seules les classes où les vitesses de vent sont non nulles sont considérées (V>1.5 m/s)

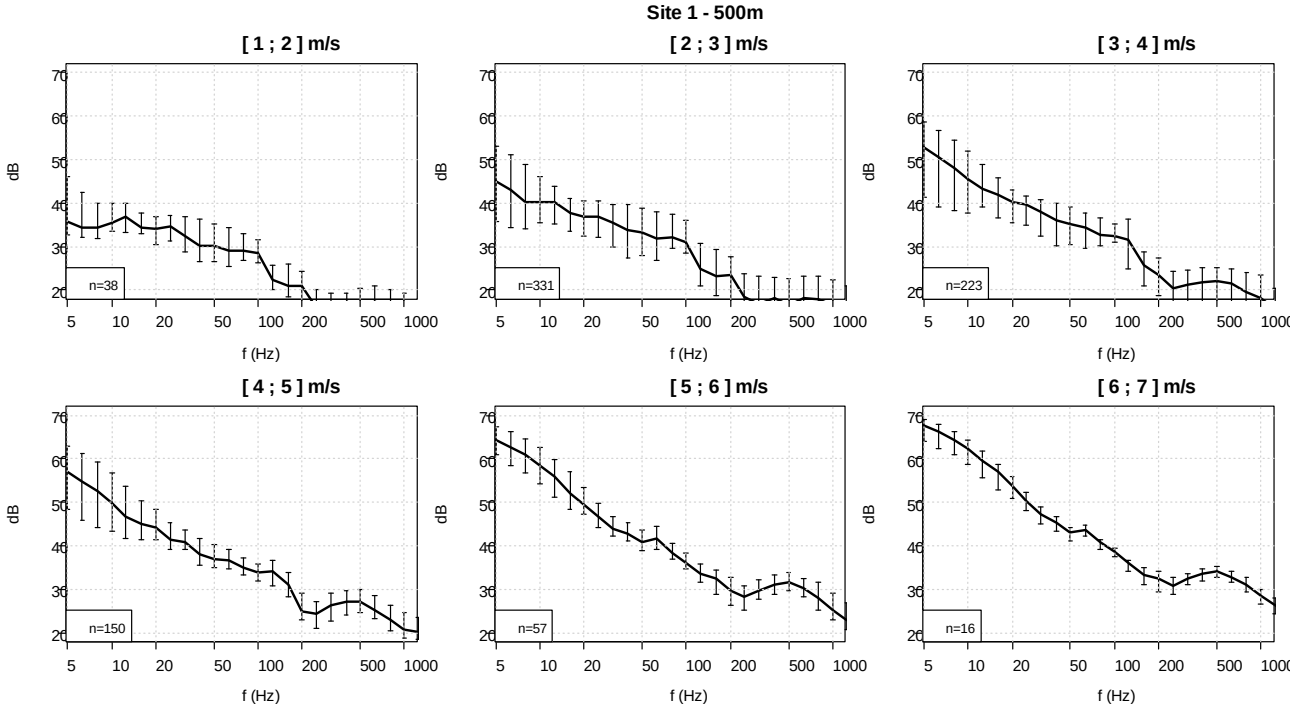
Puissance acoustique de l'éolienne



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

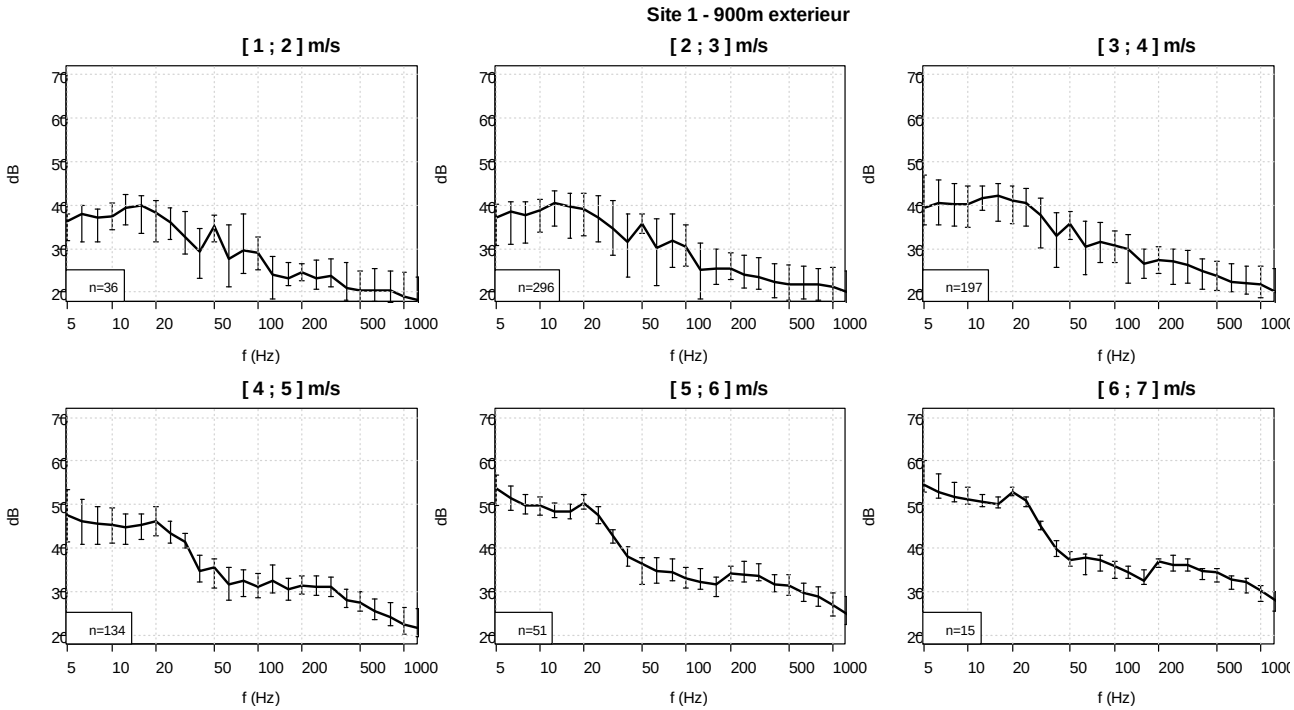
Figure 94 : spectres médians de puissance de l'éolienne, en fonction des vitesses de vent.

Niveaux sonores



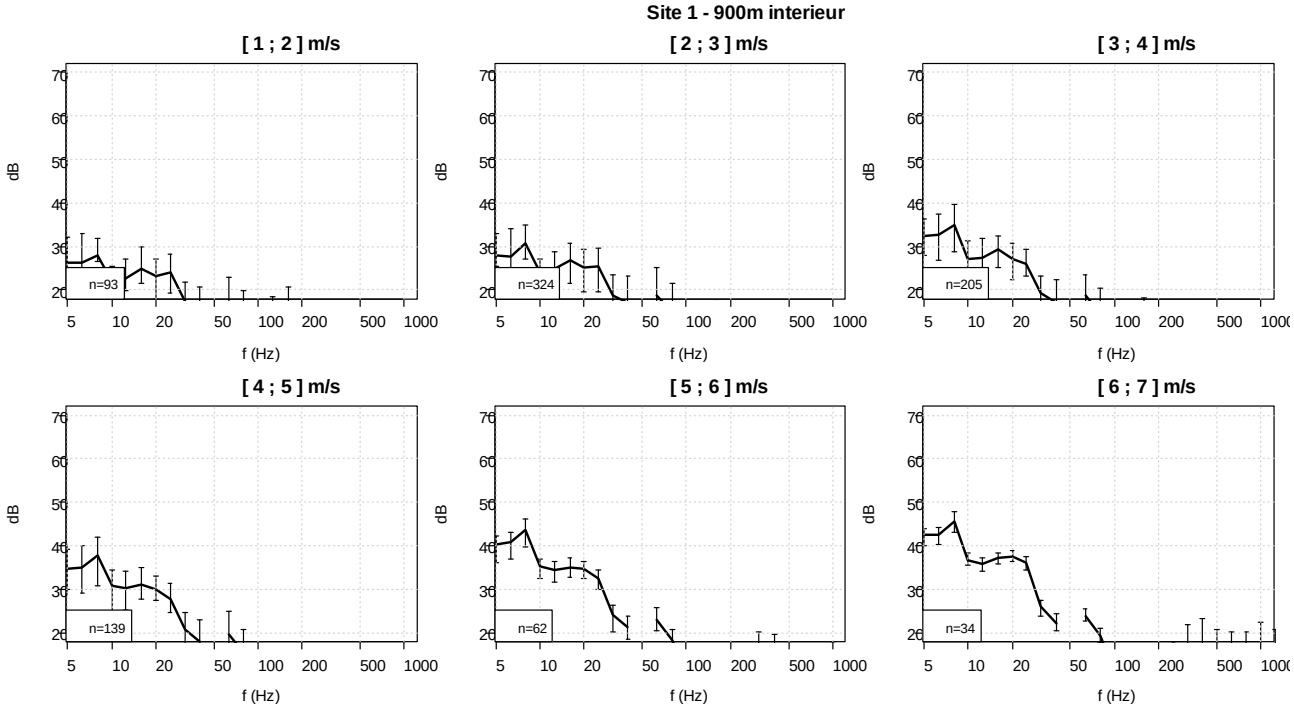
barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 95 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 96 : spectres médians du niveau sonore à 900 m (exterieur), en fonction de la vitesse de vent



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 97 : spectres médians du niveau sonore à 900 m (intérieur), en fonction de la vitesse de vent

Contribution du bruit des éoliennes aux niveaux sonores mesurés

Afin d'estimer si le bruit mesuré est bien attribuable à l'éolienne, une analyse de corrélation est réalisée entre les niveaux sonores mesurés à différentes distances, et l'émission sonore de l'éolienne. Pour chaque tiers d'octave, le coefficient de corrélation linéaire est calculé entre le niveau sonore de ce tiers d'octave mesuré à une distance donnée, et le niveau de puissance acoustique de l'éolienne, pour le même tiers d'octave. Un coefficient de corrélation élevé indique une contribution très probable de l'éolienne au bruit mesuré, tandis qu'un coefficient de corrélation faible tend à indiquer une absence de contribution de l'éolienne au bruit mesuré.

En présence de vent (V>3 m/s), on constate (Figure 98) une corrélation significative entre les spectres mesurés et le spectre d'émission (environ 0,8) aussi bien à 500 m qu'à l'extérieur de chez le riverain. Pour les IBF, cette corrélation tend à augmenter avec la vitesse de vent. Les corrélations avec la vitesse du vent (Figure 99) sont beaucoup moins élevées. Ceci tend à montrer que le bruit de l'éolienne contribue bien au bruit mesuré, et davantage que le bruit du vent.

On constate les mêmes tendances à l'intérieur, mais avec cependant des corrélations moins fortes.

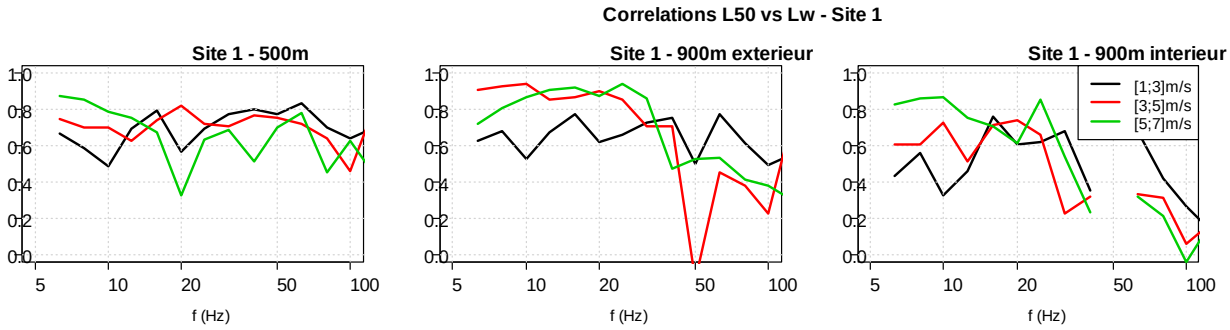


Figure 98 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et le spectre de puissance acoustique de l'éolienne

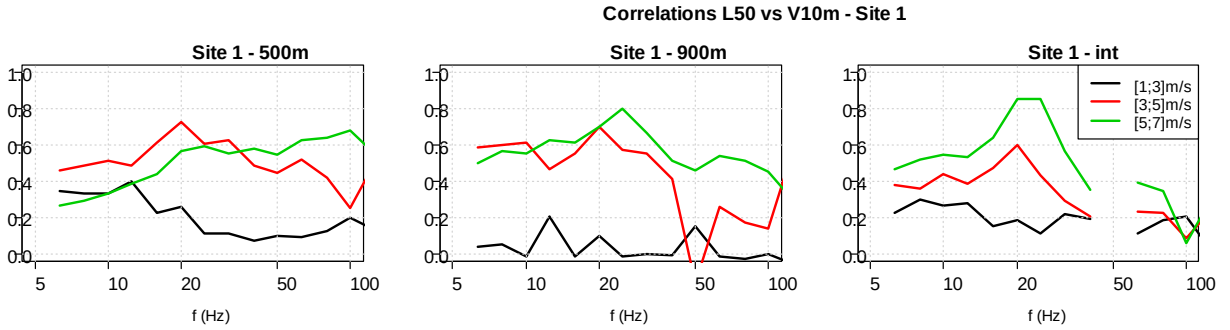


Figure 99 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et la vitesse de vent.

Site 2

Plan de situation

La localisation des capteurs est présentée sur la Figure 100. La topographie est plane et quasi horizontale (pente maximale < 1%, Figure 101).

Figure 100 : localisation des capteurs

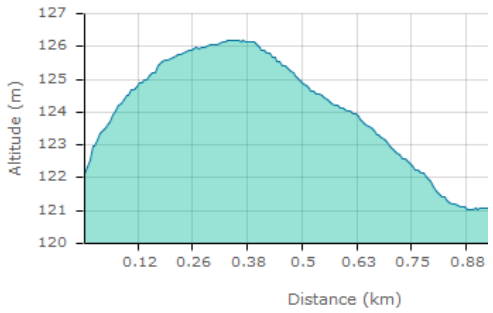


Figure 101 : profil altimétrique entre l'éolienne et le riverain (0 km=position de l'éolienne)

Azimuth de la direction éolienne->riverain : 330°.

Conditions météorologiques

Durant la période d'observation, la vitesse du vent au niveau de la nacelle a varié de 0,6 m/s à 7,0 m/s (Figure 91). La vitesse de vent médiane était de 3,1 m/s et la plus fréquente de 3,7 m/s.

Toutes les directions du vent ont été observées (Figure 91). La direction de vent médiane était de 150° et la plus fréquente de 25°, ce qui correspond à un vent transverse légèrement contraire entre l'éolienne la plus proche et le riverain.

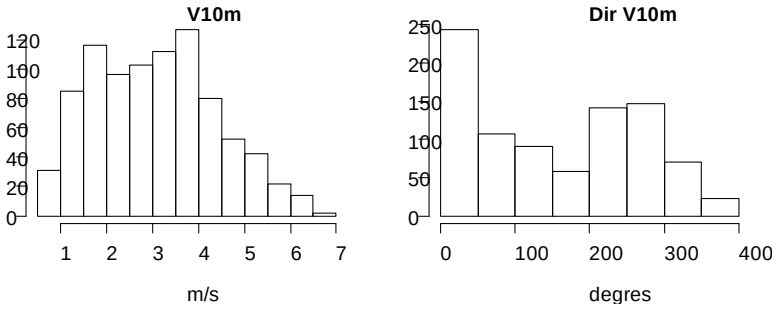
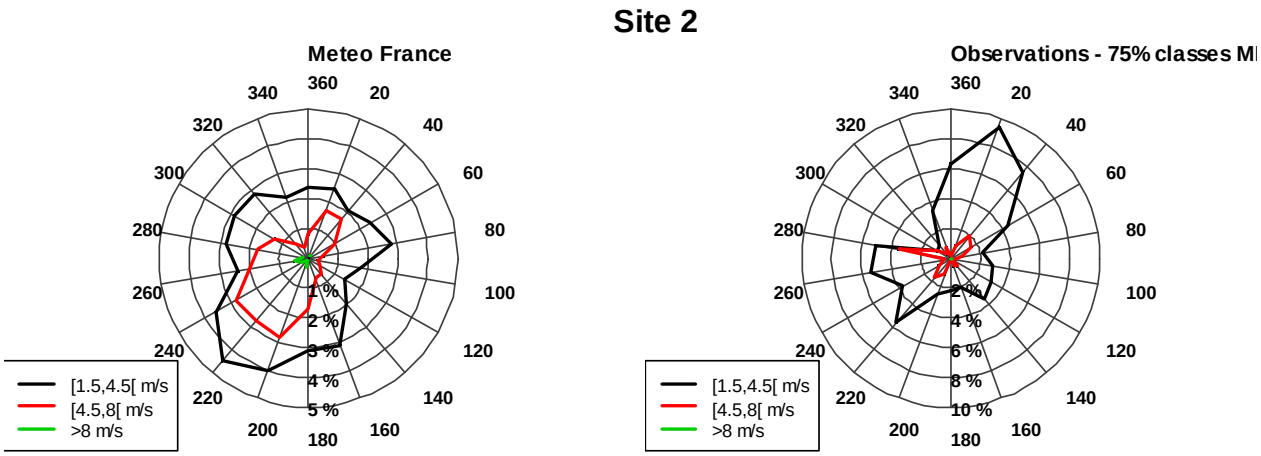


Figure 102 : histogrammes des vitesses et directions du vent durant la période d'observation. Site 2

Une comparaison entre la rose des vents moyenne du site de Météo France le plus proche du site

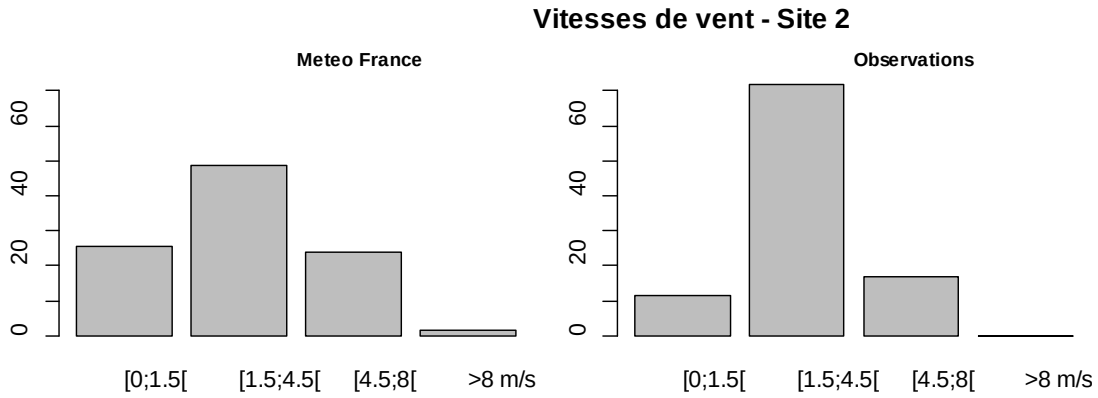
de mesure et la rose des vents relevée sur le site lors des mesures indique les conditions de vent observées[93] (classes vitesses/direction) durant la période de mesure correspondent à 75 % des conditions moyennes du site (Figure 92).



Gauche : normales de rose de vent (source : Météo France – Rouvroy-les-Merles (60)).

Droite : rose des vents observée durant la période de mesure

Figure 103 : roses des vents à 10 m de hauteur



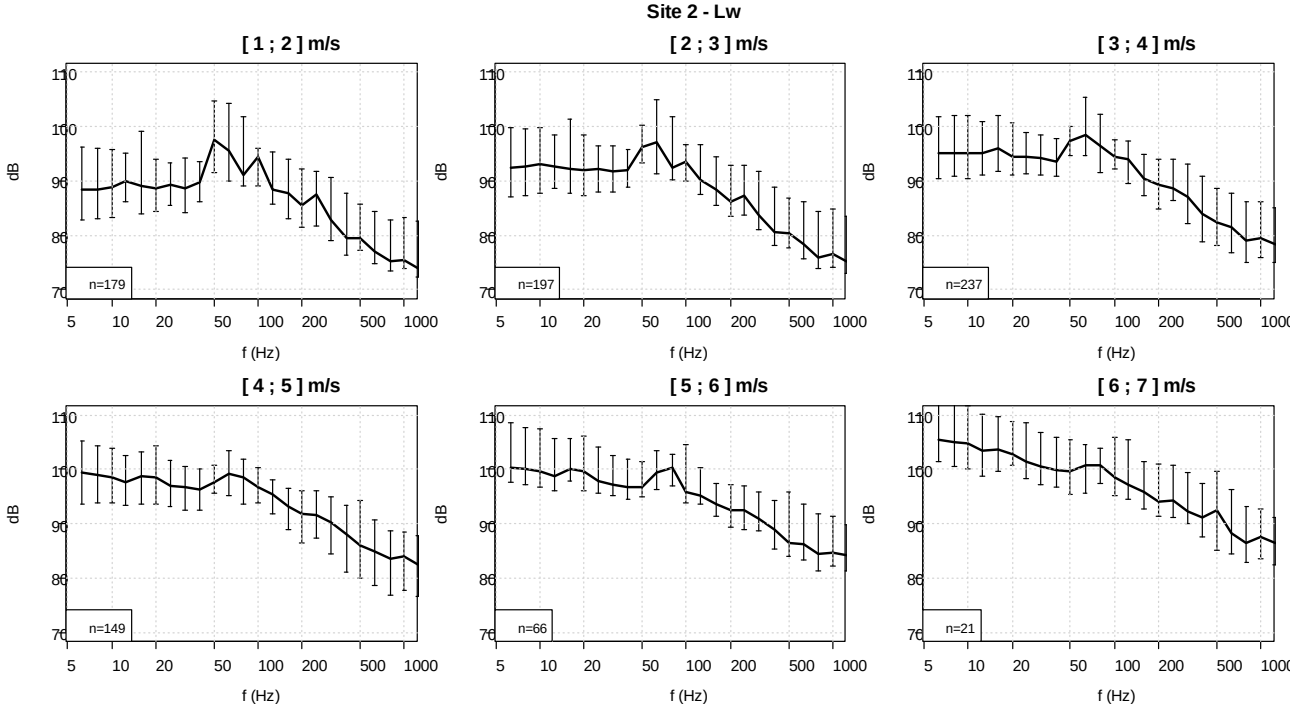
Gauche : normales de rose de vent (source : Météo France – Rouvroy-les-Merles (60)).

Droite : rose des vents observée durant la période de mesure

Figure 104 : histogrammes des vitesses de vent à 10 m de hauteur

[93] classes vitesses/direction de vent ayant au moins 10 échantillons de 10 min valides.

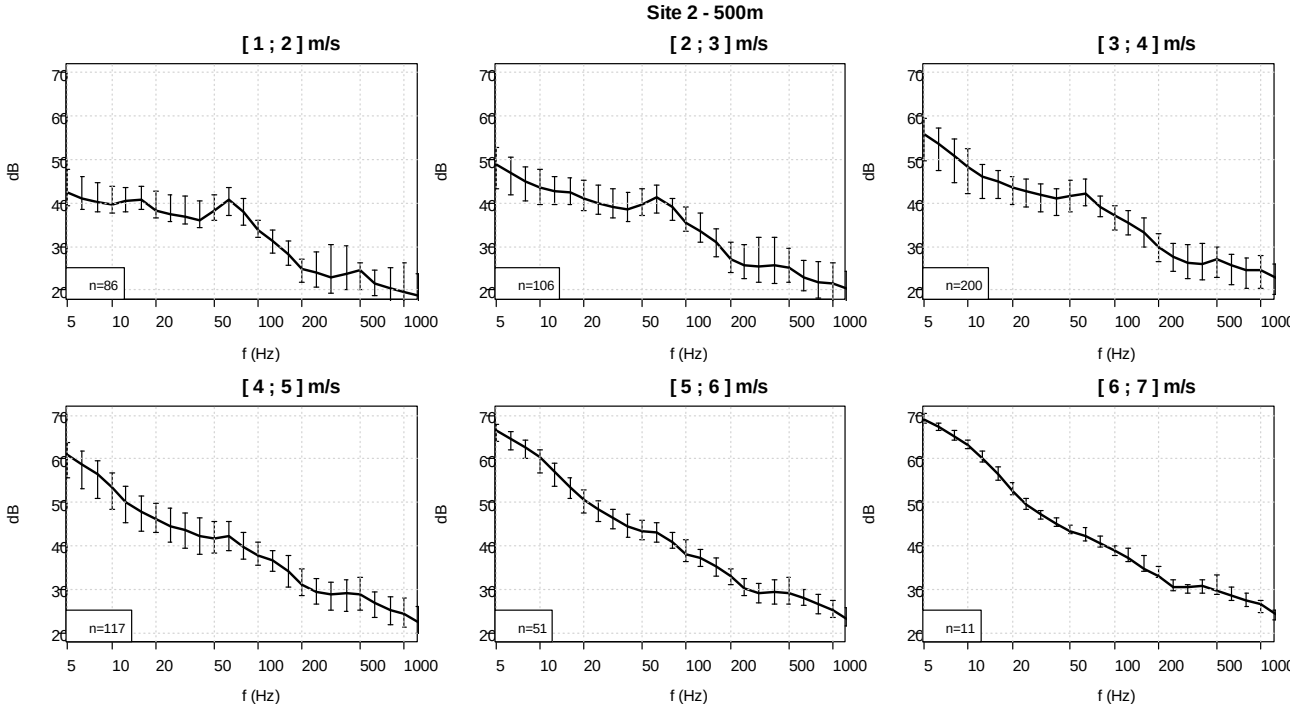
Puissance acoustique de l'éolienne



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

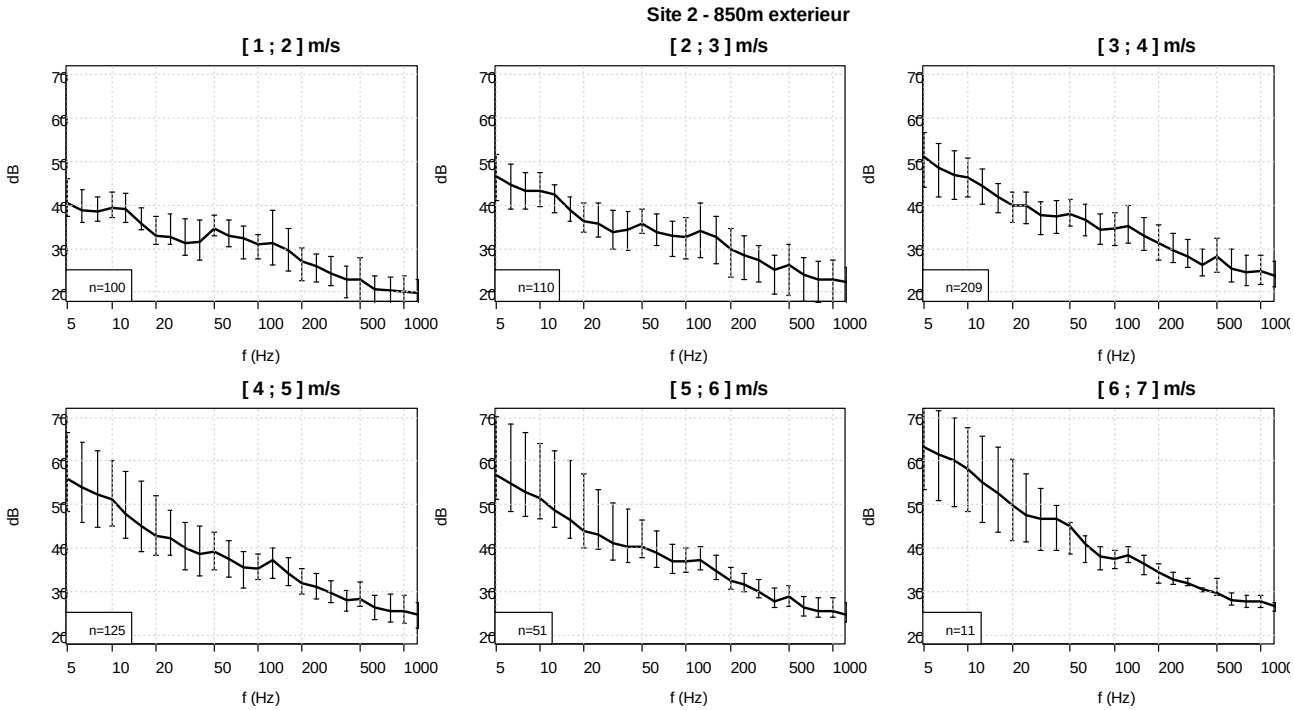
Figure 105 : spectres médians de puissance de l'éolienne, en fonction des vitesses de vent

Niveaux sonores



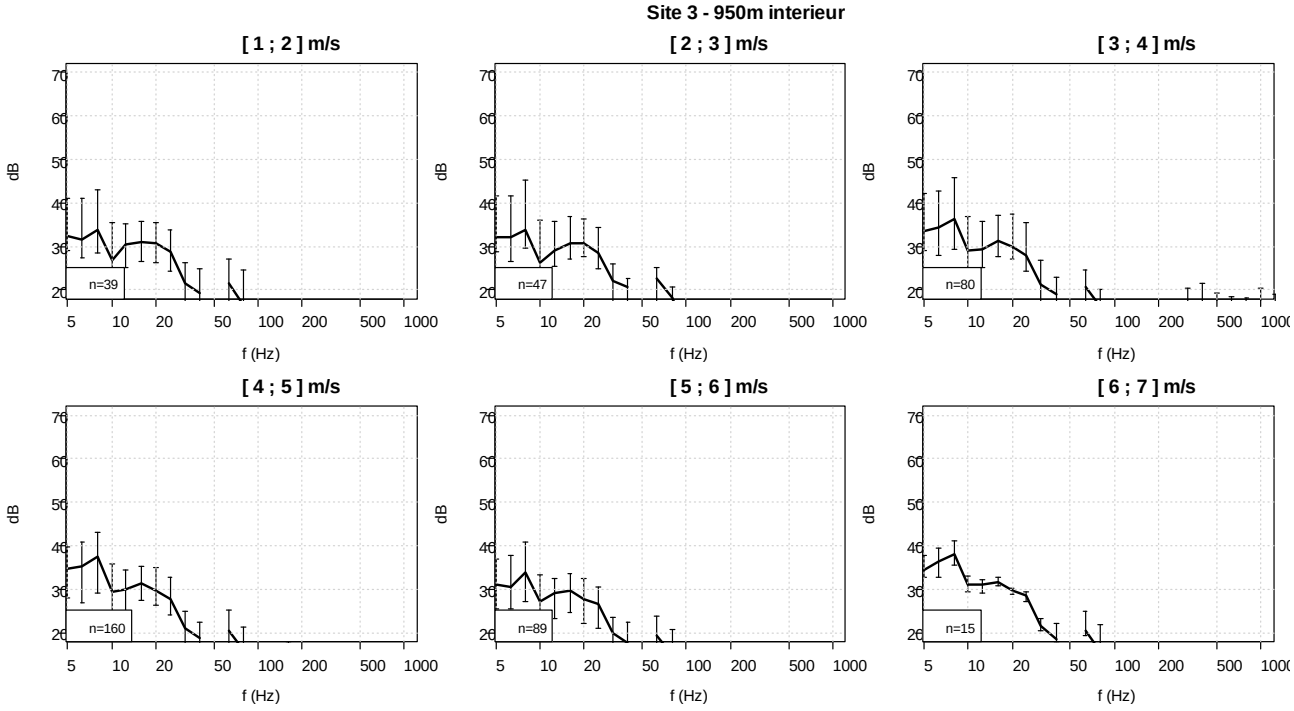
barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 106 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 107 : spectres médians du niveau sonore à 850 m (exterieur), en fonction de la vitesse de vent



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 108 : spectres médians du niveau sonore à 850 m (intérieur), en fonction de la vitesse de vent

Contribution du bruit des éoliennes aux niveaux sonores mesurés

Une analyse similaire à celle présentée pour le site 1 (voir précédemment) est menée.

En présence de vent (V > 3 m/s), on constate (Figure 109) des corrélations peu significatives entre les spectres mesurés et le spectre d'émission (< 0,6) aussi bien à 500 m qu'à l'extérieur de chez le riverain. Ces corrélations ont de plus tendance à diminuer avec la vitesse de vent. Les corrélations avec la vitesse du vent (Figure 110) sont également eu significatives et ne semblent pas dépendre de la vitesse du vent. Ceci tend à indiquer que le bruit de l'éolienne contribue peu ou pas au bruit mesuré, et que des bruits locaux ont perturbé les mesures.

On constate les mêmes tendances à l'intérieur.

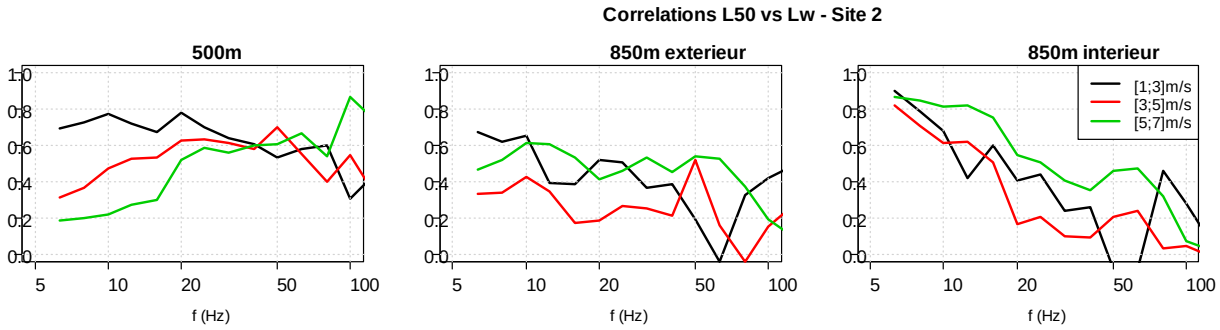


Figure 109 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et le spectre de puissance acoustique de l'éolienne

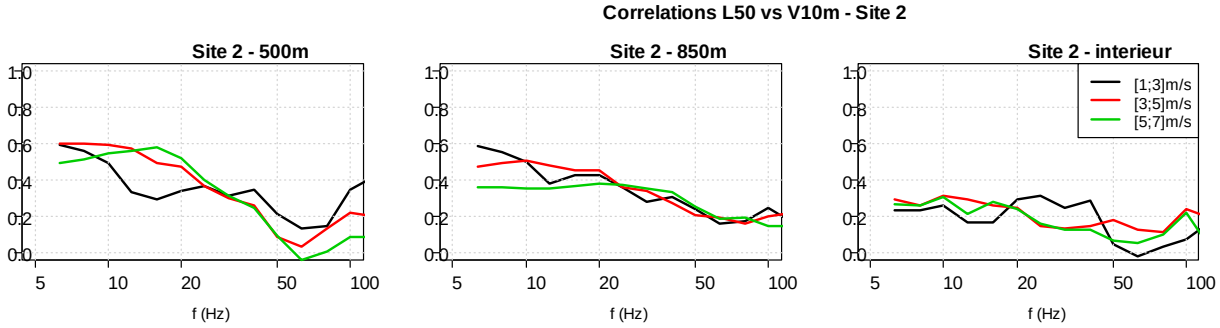


Figure 110 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et la vitesse de vent

Site 3

Plan de situation

La localisation des capteurs est présentée sur la Figure 111. La topographie est quasi plane avec une légère déclivité entre l'éolienne et le riverain (pente=-4%, Figure 112).

Figure 111 : localisation des capteurs

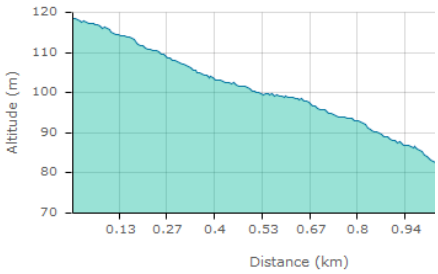


Figure 112 : profil altimétrique entre l'éolienne et le riverain (0km=position de l'éolienne)

Azimuth de la direction éolienne->riverain : 203°.

Conditions météorologiques

Durant la période d'observation, la vitesse du vent au niveau de la nacelle a varié de 0,1 m/s à 7,8 m/s (Figure 91). La vitesse de vent médiane était de 4,1 m/s et la plus fréquente de 4,5 m/s.

Toutes les directions du vent ont été observées (Figure 91). La direction de vent médiane était de 300° et la plus fréquente de 320°, ce qui correspond à un vent transverse légèrement portant entre l'éolienne la plus proche et le riverain.

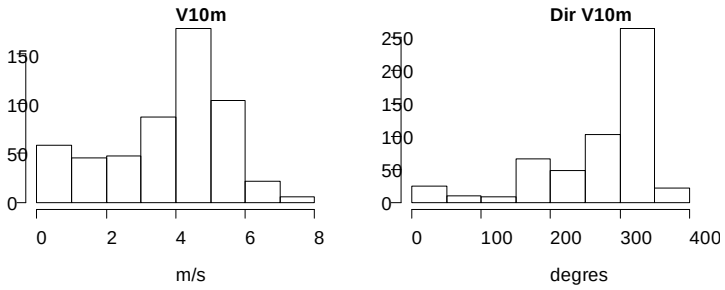
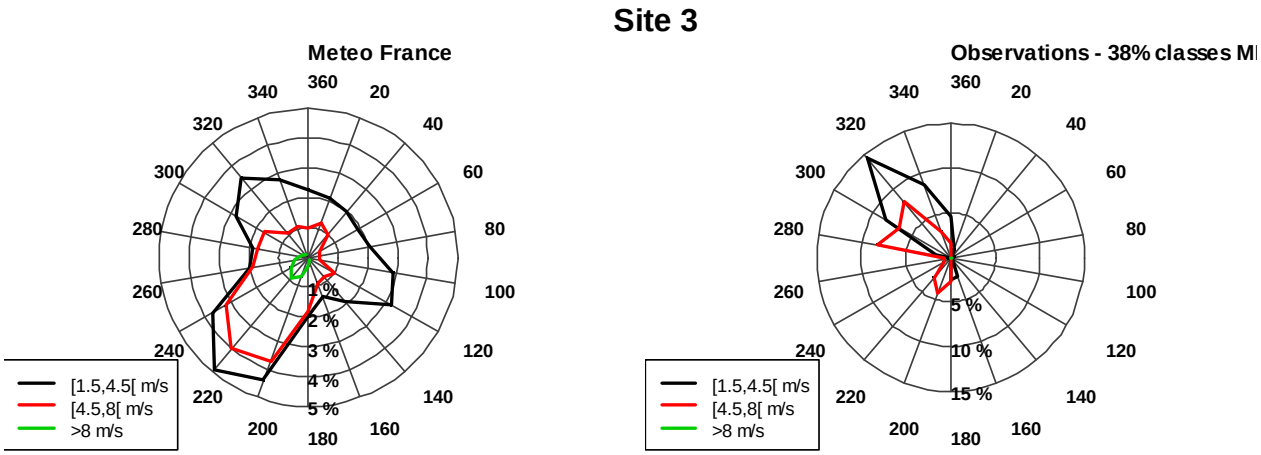


Figure 113 : histogrammes des vitesses et directions du vent durant la période d'observation. Site 3

Une comparaison entre la rose des vents moyenne du site de Météo France le plus proche du site de mesure et la rose des vents relevée sur le site lors des mesures indique les conditions de vent

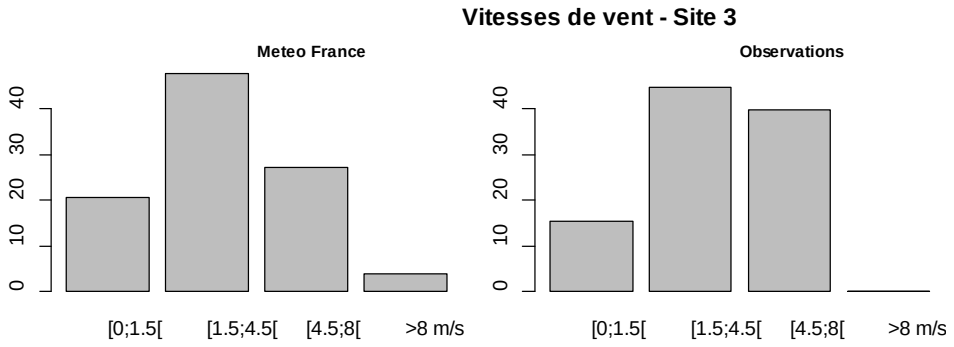
observées[94] (classes vitesses/direction) durant la période de mesure correspondent à 38 % des conditions moyennes du site (Figure 92).



Gauche : normales de rose de vent (source : Météo France – Aulnois sous Laon (02)).

Droite : rose des vents observée durant la période de mesure

Figure 114 : roses des vents à 10 m de hauteur



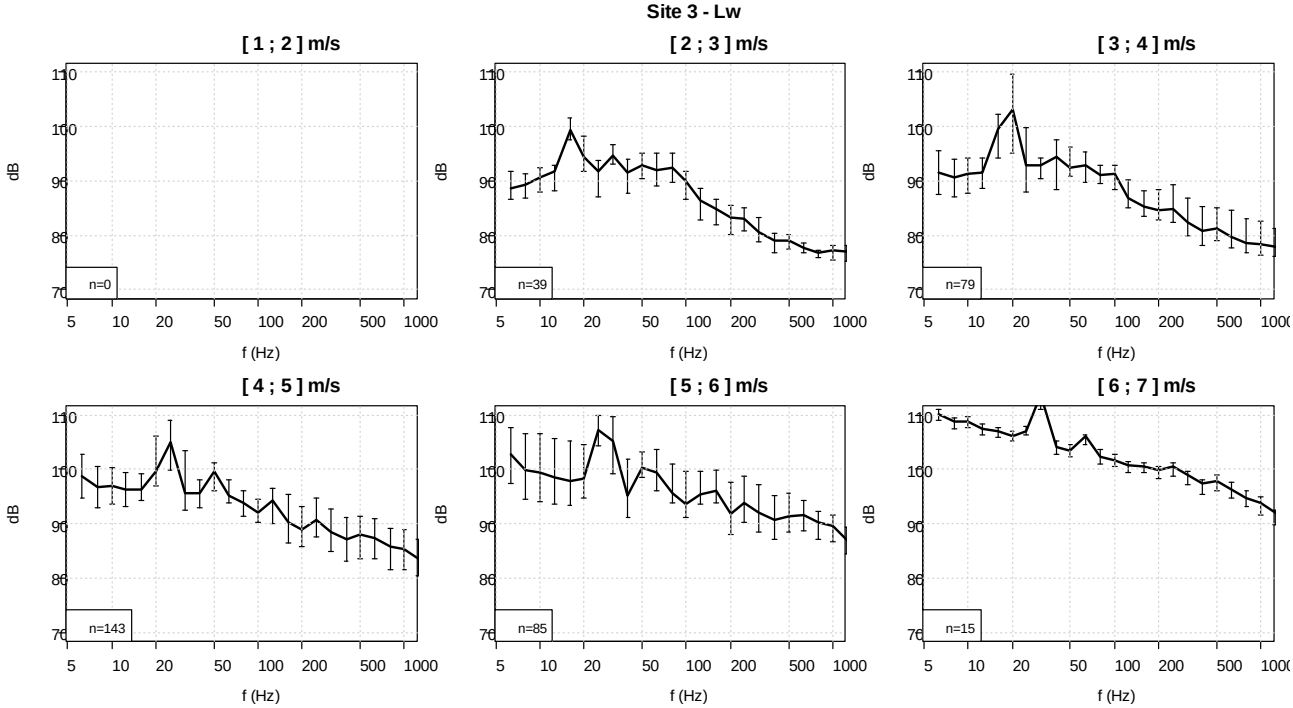
Gauche : normales de rose de vent (source : Météo France – Aulnois sous Laon (02)).

Droite : rose des vents observée durant la période de mesure

Figure 115 : histogrammes des vitesses de vent à 10 m de hauteur

[94] classes vitesses/direction de vent ayant au moins 10 échantillons de 10 min valides.

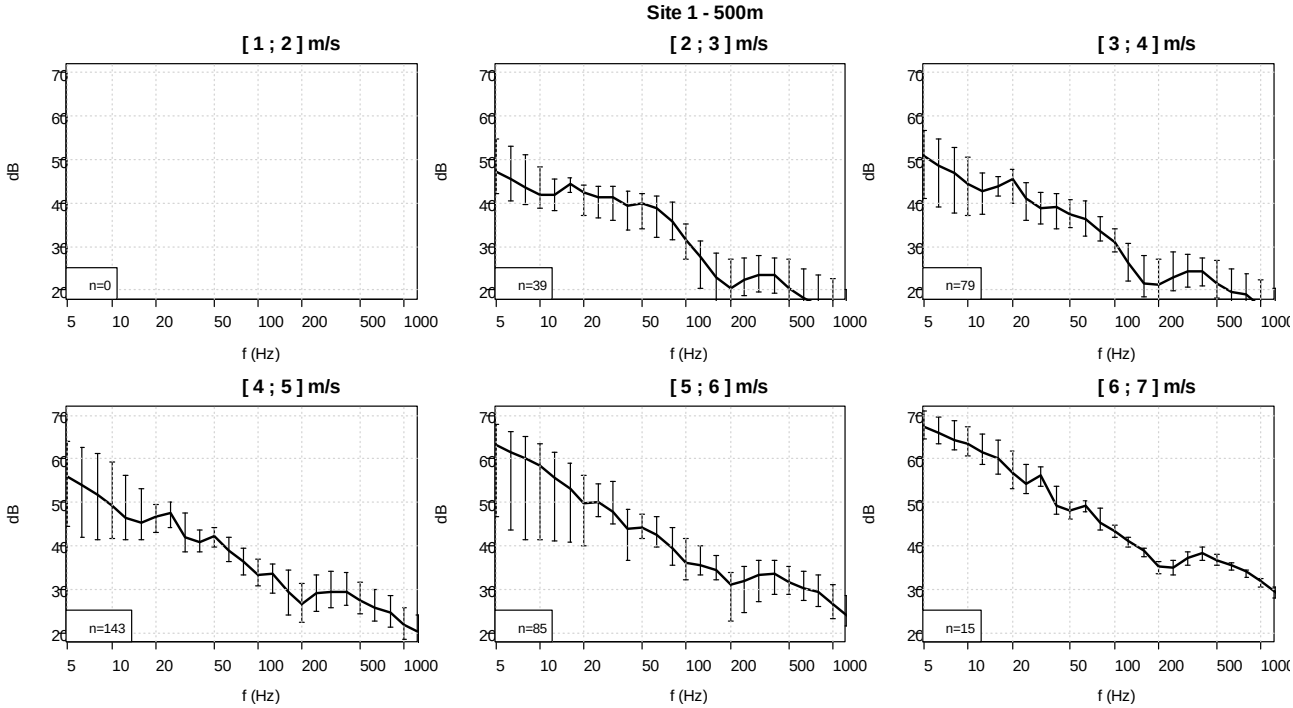
Puissance acoustique de l'éolienne



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

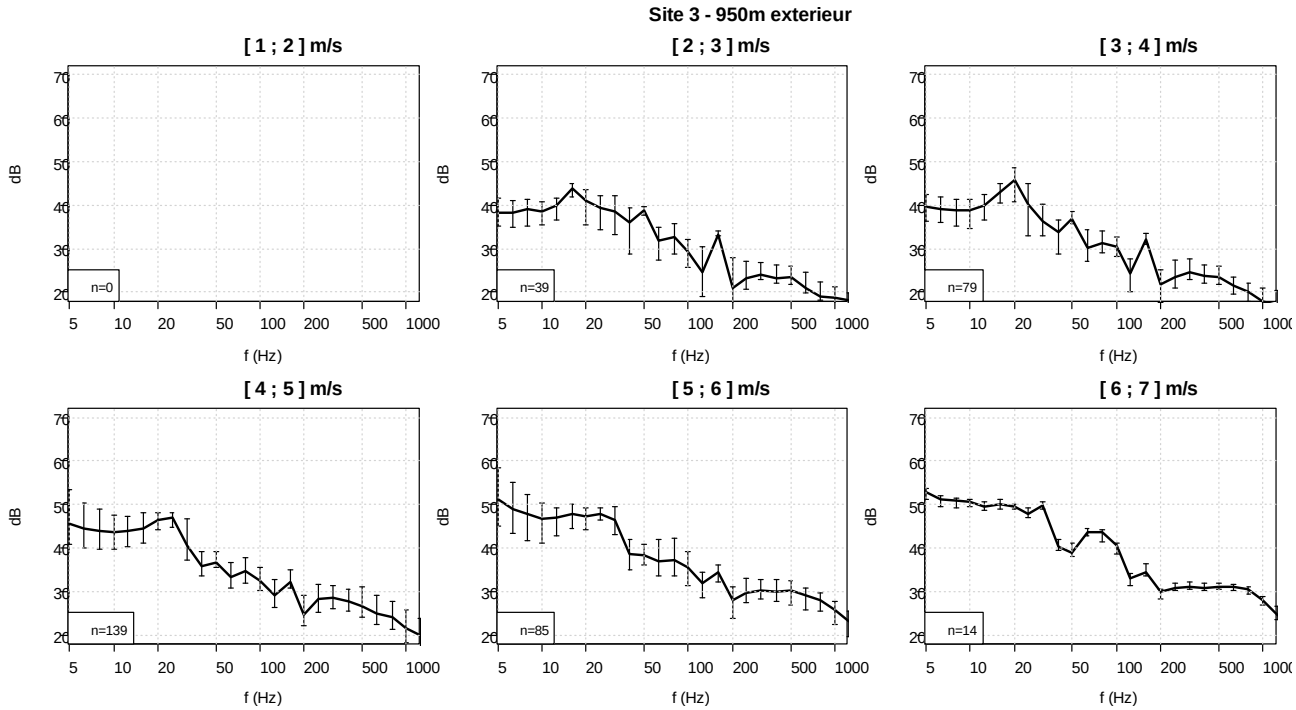
Figure 116 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent (

Niveaux sonores



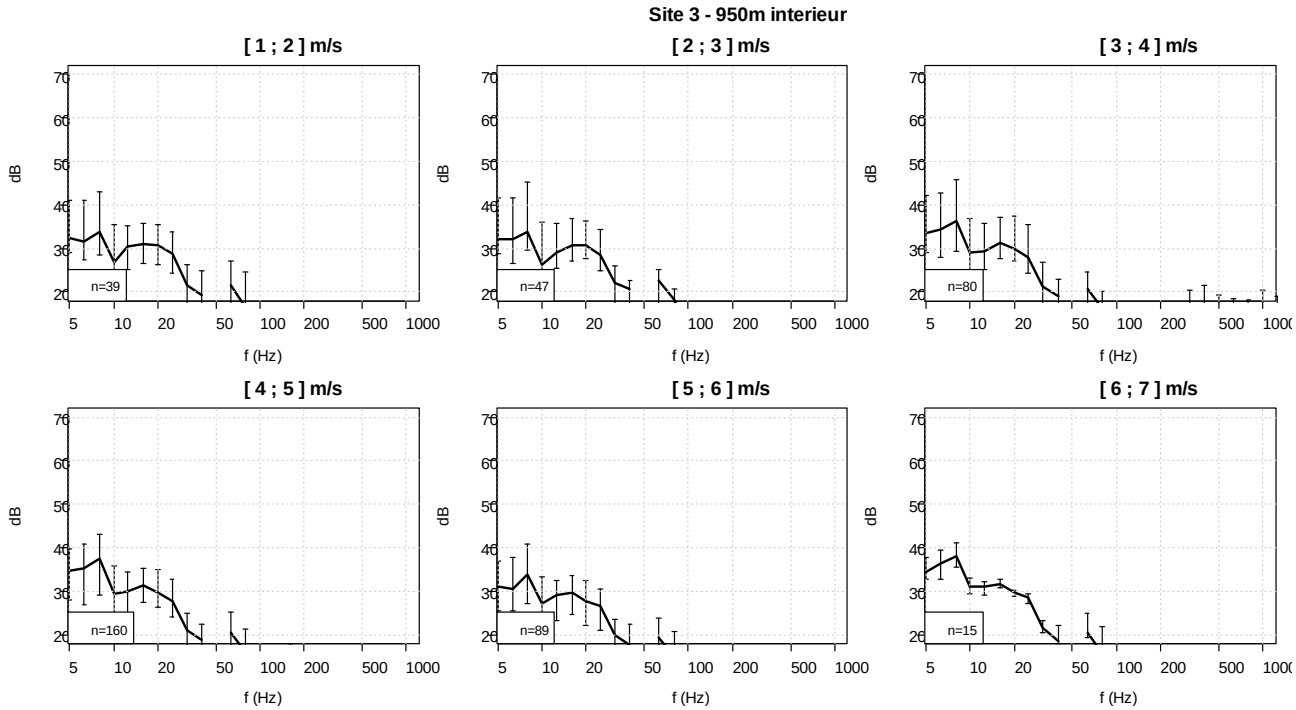
barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 117 : spectres médians du niveau sonore à 500 m, en fonction de la vitesse de vent



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 118 : spectres médians du niveau sonore à 950 m (exterieur), en fonction de la vitesse de vent



barres verticales : intervalles contenant 75 % des données, n : nombre d'échantilons valides

Figure 119 : spectres médians du niveau sonore à 950m (interieur), en fonction de la vitesse de vent

Contribution du bruit des éoliennes aux niveaux sonores mesurés

Une analyse similaire à celle présentée pour le site 1 (voir précédemment) est menée.

En présence de vent (V > 3 m/s), on constate (Figure 120) une corrélation significative entre les spectres mesurés et le spectre d'émission (environ 0,8) aussi bien à 500 m qu'à l'extérieur de chez le riverain. Pour les IBF, à 500 m cette corrélation tend à augmenter avec la vitesse de vent. Les corrélations avec la vitesse du vent (Figure 121) sont moins élevées. Ceci tend à montrer que le bruit de l'éolienne contribue bien au bruit mesuré, et davantage que le bruit du vent.

A l'intérieur de chez le riverain, hormis pour des vitesses de vent élevées, les corrélations sont très faibles, ce qui tendrait à indiquer que le bruit des éoliennes ne contribuen pas au bruit mesuré dans ces cas.

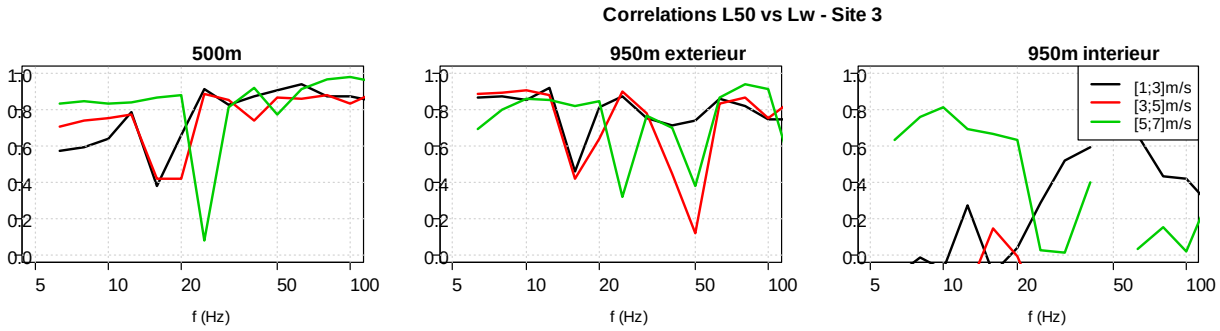


Figure 120 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et le spectre de puissance acoustique de l'éolienne

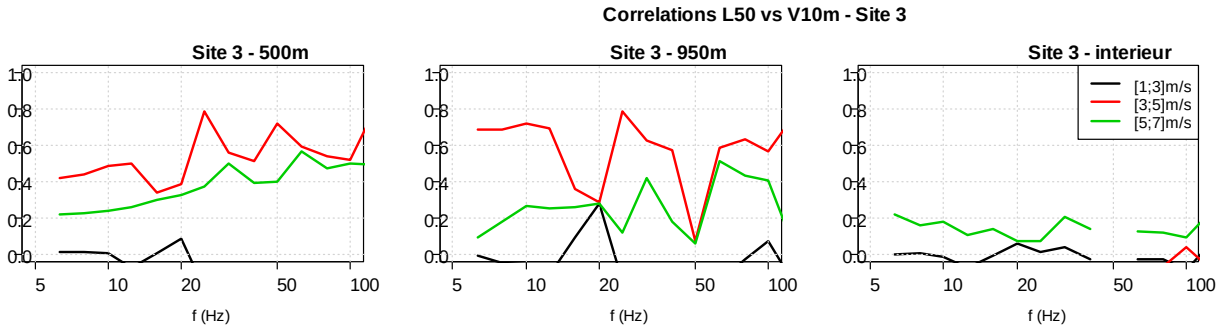


Figure 121 : coefficients de corrélations linéaires entre le spectre de niveau sonore mesuré à différentes distances et la vitesse de vent

Compléments sur la mis en oeuvre expérimentale

Performances acoustiques de la protection anti-vent utilisée pour le mesurage de l'émission sonore des éoliennes

Le dispositif de mesure de l'émission acoustique des éoliennes est constitué, suivant les prescriptions de la norme NF-EN 61400-11 des éléments suivants :

- un microphone posé au sol au centre d'une plaque circulaire de 1 m de diamètre ;
- une demi boule anti-vent standard de 9 cm de diamètre ;
- une protection anti-vent secondaire hémisphérique de 50 cm de diamètre et constituée d'une plaque de mousse.

Figure 122 : dispositif de mesure de l'émission acoustique avec (droite) et sans (gauche) protection secondaire

La double protection anti-vent peut introduire un biais dans la mesure acoustique qui a été quantifié par des mesures dans la salle semi-anéchoïque de l'Ifsttar. Une correction est alors effectuée lors du post-traitement acoustique sur les niveaux sonores mesurés en ajoutant le terme correctif C fourni dans le Tableau 40 aux niveaux sonores mesurés par bande de tiers d'octave.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1250	1600	1000	2000	2500	3150	4000	5000	Global(A)
C (dB)	0	0,1	0,1	0	-0,1	-0,1	0,1	0,9	0,5	1,1	0,5	0,9	0,1	-0,9	-0,6	0	2,7	2,4	0,6

Tableau 40 : correction C due à l'influence de la protection complète + plaque sur la réponse fréquentielle du dispositif de mesure

NB : Pour les IBF, la correction à appliquer est inférieure ou égale à 0,1 dB.

Calcul de la vitesse de vent standardisée

La vitesse de vent standardisée (vitesse de vent ramenée de façon conventionnelle à 10 m de haut) est obtenue à partir de la iitesse de vent mesurée au niveau de la nacelle à l'aide de la relation suivante (ISO 61400-11) :

$$V_S = V_H \frac{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}}\right)}{\ln\left(\frac{H}{z_{0ref}}\right)}$$

où

- V_H est la vitesse mesurée au niveau de la nacelle située à la hauteur H ;
- z_{ref} est la hauteur de référence de 10 m ;
- z_{0ref} est la longueur de rugosité de référence de 0,05 m.

Calcul de la puissance acoustique apparente de l'éolienne

La puissance acoustique apparente de l'éolienne L_w est obtenue en corrigeant le niveau sonore L_{eq} mesuré au niveau du point A_{eol} de l'atténuation due à la protection anti-vent, de l'effet de baffle de la plaque, de la divergence géométrique et de l'atténuation atmosphérique, suivant la relation :

$$L_w(f) = L_{eq}(f) + C_{BAV}(f) - 6 + 10\log\left(4\pi R^2\right) + \alpha(f)R$$

où

- f est la fréquence nominale de tiers d'octave
- C_{BAV} est la correction due à la protection anti-vent (voir ci-dessus)
- $R = \sqrt{H^2 + d^2}$ est la distance oblique entre le centre du rotor et le microphone (H : hauteur de la nacelle, d : distance au sol entre le microphone et l'éolienne)
- α est le coefficient d'atténuation atmosphérique fourni par la norme ISO 9613-1.

NB : pour les IBF, et les distances considérées pour le calcul de la puissance apparente les corrections C_{BAV} et αR sont inférieures à 0,5 dB.

Matériel de mesure utilisé

Les sonomètres et les microphones utilisés sont de classe I au sens des normes NF EN 60804 ou NF EN 61-672-1 et ont une gamme d'utilisation en accord avec la gamme de basse fréquence étudiée (de 1 Hz à 12,5 Hz minimum).

	Enregistreur	**Commentaires**
A_{eol}	Sonomètre B&K 2250 + microphones/préamplificateurs B&K 4189 / B&K ZC-0032	Enregistrement tiers d'octave [12,5 Hz - 10 kHz]
A_{500}	Sonomètre Rion NL62	Enregistrement tiers octaves [1 Hz – 10 kHz] + Global dBA
A_{int}	Enregistreur 2 voies Sinus Toughbook + microphones/préamplificateurs B&K 4189 / B&K 2671	Enregistrement tiers octaves [1 Hz – 10 kHz] + Global dBA
A_{ext}		

	Anémomètre à ultrasons 3D	**Enregistreur**	**Commentaires**
M	Young 81 000	Datalogger Avisaro Logger Box 2.0 M21133	- Vitesse et direction du vent échantillonnée à 20 Hz - Vitesse et direction du vent moyennées sur 10 min.

Annexe 8 : Analyse des articles se rapportant à la VAD

En 1980, l'équipe d'Alves Pereira et Castelo Branco a défini la VAD à partir d'une étude portant sur 10 patients (pilotes, techniciens, chauffeurs) travaillant dans l'aéronautique et ayant subi une opération à cœur ouvert. Des biopsies ont été étudiées au microscope et par microscopie électronique. Aucune étude statistique n'a été réalisée, le nombre de coupes observées n'est pas indiqué et il n'y a pas de groupe de témoins appariés ayant subi une opération de ce type. L'épaisseur du péricarde variant entre 1,03 et 2,23 mm correspond macroscopiquement, selon les auteurs, à une néoformation de deux nouvelles couches tissulaires. Des cellules mésothéliales[95] en provenance de la monocouche mésothéliale, la plus externe, accolée aux parois du péricarde, ainsi que d'autres cellules (desmosomes[96]) pénètrent dans cette paroi, témoignant d'une phagocytose. Les auteurs observent de nombreux débris cellulaires au voisinage des deux nouvelles couches de fibrilles élastiques d'élastine avec un nombre important de macrophages dans la couche interne. Au niveau central, la couche cellulaire de collagène est épaissie, avec un remaniement de l'architecture extracellulaire[97]. Celui-ci est visualisé par des extensions cytoplasmiques de fibroblastes suivant les faisceaux de fibres de collagène s'entrecroisant avec les fibres d'élastine. Seulement six photos de microscopie électronique sont fournies pour argumenter ces résultats.

Dans un article de 2007, Castelo Branco *et al* reprennent tous les résultats obtenus par des études concernant des pathologies respiratoires, mais toujours avec un biais méthodologique important dû à des descriptions incomplètes des conditions expérimentales (Castelo Branco, Ferreira, et Alves-Pereira 2007). Après 4 années d'exposition professionnelle aux infrasons, des problèmes respiratoires apparaissent mais ils disparaissent pendant les vacances. Pour des expositions plus longues, les auteurs observent des épanchements pleuraux, des insuffisances respiratoires, des fibroses et même des tumeurs. Des résultats d'autopsie chez un pilote âgé et décédé révèlent une fibrose pulmonaire attribuée initialement aux poussières environnementales.

Pour des intensités de 105 à 155 dB pendant 2 heures, avec un bruit blanc de large bande fréquentielle, Ponomarkov observe chez des chiens des hémorragies capillaires comme des plus gros vaisseaux ainsi qu'un remaniement de la matrice extra cellulaire des cellules alvéolaires (Ponomarkov *et al.* 1969).

De même, Fonseca *et al* attribuent le remaniement du cytosquelette gastro-duodénal aux vibrations des basses fréquences en montrant des résultats obtenus avec une exposition continue pendant 1 à 5 semaines chez des rats ne pouvant sortir de leur cage, avec un spectre de fréquence étendu (Fonseca *et al.* 2012). L'intensité de ces sons était comprise entre 60 et 80 dB pour les spectres fréquentiels de 6 à 60 Hz et de 1 000 à 2 500 Hz, et comprise entre 80 et 100 dB

---

[95] La couche de cellules mésothéliales, plates, forme une membrane qui tapisse la surface interne des cavités de l'organisme.

[96] Un desmosome est une structure protéique intercellulaire dont le rôle est de maintenir assemblées deux cellules voisines et d'offrir des points d'ancrage aux filaments intermédiaires des cellules.

[97] La matrice extracellulaire (MEC), appelée aussi ciment intercellulaire, est un assemblage de macromolécules (de nature protéique et glucidique) qui lient entre elles des cellules homologues ou hétérologues et les organisent en tissus. Dans les tissus conjonctifs, elle est sécrétée par les fibroblastes. La MEC est impliquée aussi bien dans les contacts directs entre cellules que dans l'action des diverses molécules de signalisation. Les principales macromolécules de la MEC sont des polysaccharides (glycosaminoglycanes et protéoglycanes) et des protéines fibreuses, des protéines de structure (collagènes et élastines) ou d'adhérence (fibronectine et laminine). Elle a aussi un rôle important dans le contrôle de la prolifération cellulaire. Un simple changement de forme, lié à des modifications de rapport avec l'environnement entraîne des modifications biochimiques et moléculaires des cellules et un changement de leur programme génétique.

pour un spectre de 60 à 1 000 Hz. Ne trouvant pas de différences d'atteintes morphologiques entre les rats exposés pendant 1 semaine et ceux exposés plus longtemps, les auteurs en déduisent le rôle des vibrations. Dans la discussion, ils éliminent la participation d'un stress inducteur en faisant référence aux travaux de Nakamura *et al.* (Nakamura et Inukai 1998) qui montrent une altération de la muqueuse gastrique chez des rats soumis à des vibrations sur le corps entier d'accélération 3 g, avec un mouvement sinusoïdal de 10 Hz, pendant 90 min, même chez les rats après vagotomie dans le but d'éliminer la participation d'un ulcère nerveux.

Plus récemment, Oliveira *et al*. ont rapporté que le collagène de la paroi vasculaire des glandes parotides proliférait parallèlement aux temps d'exposition (Oliveira *et al.* 2013). Là encore, les rats sont exposés de façon continue, 24 heures sur 24, de 1 à 13 semaines, à des intensités supérieures à 90 dB et un spectre fréquentiel de 50 à 500 Hz. Cependant, il faut noter que l'on ne peut pas modéliser l'exposition des sons émis par les éoliennes en utilisant des expositions continues pendant 1 semaine ou plus, avec des intensités élevées ou des vibrations corps entiers.

Un autre groupe (Kåsin *et al.* 2012) n'a pas pu reproduire les résultats décrits dans le paragraphe précédent. Kasin *et al*. ont cherché à mettre en évidence l'augmentation de l'épaisseur du péricarde et la formation d'une fibrose pulmonaire chez 27 pilotes d'hélicoptères ayant plus de 4 000 heures de vol, et exposés à des intensités supérieures à 90 dB et des fréquences inférieures à 100 Hz. Les vibrations émises par un hélicoptère sont de 0,3 à 0,5 $m.s^{-2}$. La fréquence fondamentale des pales est de 17 Hz. Les auteurs ont recruté un groupe contrôle de 27 personnes vivant dans un environnement calme et les ont appariées sur l'âge. Tous ces sujets n'avaient aucune pathologie et ne fumaient pas. Ils ont réalisé sur chacun d'eux un scanner (64 coupes de 2 mm d'épaisseur, dans des orientations similaires) couplé à un électrocardiogramme. Les coupes du péricarde et du poumon ont été analysées par deux radiologues différents, en double aveugle. Les tests statistiques (coefficients de corrélation de Pearson et d'incertitude de Bland Altman) ont été calculés. Quel que soit le plan oblique de la coupe du péricarde, aucune différence statistique n'a été relevée concernant l'épaisseur du péricarde mesuré à 1,38 versus 1,37 mm (SD = 0,54 versus 0,33 mm) respectivement chez les pilotes et le groupe témoin. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par d'autres auteurs chez des sujets témoins. Une fibrose pulmonaire de type I a été décelée chez un seul pilote, tous les autres résultats étant normaux. Cette étude de très bonne qualité ne valide pas le rôle des sons basses fréquences et des vibrations dans ces pathologies et contredit l'existence de la VAD.

Dans une autre étude de 2009, Kasin et al. ont comparé les taux sanguins de 40 biomarqueurs (molécules solubles de l'adhésion cellulaire, cytokines, facteurs d'activation du complément, récepteurs lymphocytaires, marqueurs de l'hypertension, de l'hémostase, etc.) (Kåsin *et al.* 2009). Les prélèvements ont été effectués à 8 h et juste après un vol de 3,5 heures en hélicoptère, d'une part chez 6 pilotes (Gr. A), d'autre part chez 6 volontaires sains non exposés depuis plus de 4 semaines (Gr. B). Les vibrations enregistrées dans les 3 axes orthogonaux pour des fréquences de 1,25 Hz à 100 Hz sont comprises entre 0,21 et 0,39 $m.s^{-2}$. Les sons enregistrés de 94,7 dBA couvrent une bande de fréquence large entre 0,5 et 20 000 HZ. Pour s'abstraire de la variabilité journalière des paramètres biologiques, les sujets témoins ont été prélevés de nouveau aux mêmes heures, plusieurs semaines après le vol. Les valeurs mesurées sont comparables dans le groupe contrôle et chez les pilotes d'hélicoptère. Avant et après exposition, on retrouve dans les deux groupes une augmentation de la protéine adhésion soluble VCAM-1, augmentation qui est retrouvée chez des sujets sains après des exercices physiques d'endurance pendant 1 h. Les auteurs confirment donc l'absence de variation des paramètres systémiques qui seraient dues aux vibrations et sons produits dans les hélicoptères. L'absence de différence significative infirme la validité de la VAD.

Les travaux de Silva *et al*. de 1999 et 2002 sont intéressants à commenter (Silva *et al.* 1999, Silva *et al.* 2002). Ils étudient l'effet des vibrations et/ou du bruit dans différentes populations travaillant dans l'aéronautique. Ces populations sont exposées au bruit et à plus ou moins de vibrations (Silva *et al.* 1999). Le groupe contrôle est représenté par des militaires au sol de la même base. Le groupe 1 est exposé à des vibrations localisées (bras) et au bruit de haute intensité de la machine

utilisée, dont le spectre s'étend jusqu'aux hautes fréquences. Les groupes 2 à 4 sont exposés à des vibrations corps entier et des bruits de hautes intensités correspondant à un enrichissement en basses fréquences. Sur des prélèvements de sang périphérique, les auteurs ont isolé les lymphocytes et mesuré le nombre d'échanges de segments de chromatide sœur (test de génotoxicité). Les groupes 2 à G présentent un nombre d'échanges sur les chromosomes statistiquement plus élevé que les sujets contrôles. En 2002, pour valider le rôle des vibrations, Silva *et al*. ont exposé des souris à des sons de fréquence inférieure à 500 Hz (I dB à 100 +/- 10), pendant 300 heures (NV1) ou 600 heures (NV2), à raison de 8 heures par jour. Les groupes NV1 et NV2 étaient, de plus, soumis à des vibrations corps entier, de fréquence 12,06 Hz, d'amplitude 2 mm et d'accélération 11,4 $m.s^{-2}$ (1,16 g). Les auteurs ont étudié les lymphocytes prélevés dans la rate de ces animaux. Ils ont mesuré le nombre d'échanges de chromatides sœurs des chromosomes et l'index de réplication. Ils ont montré que l'exposition au bruit seul est sans effet, ne montrant aucune différence avec le groupe contrôle. Par contre, le retard dans la progression du cycle cellulaire (index de réplication) et l'augmentation du nombre d'échanges sont statistiquement différents dans les groupes NV1 et NV2 par rapport au groupe contrôle, comme par rapport aux groupes exposés au bruit seul. Bien que le nombre d'animaux ne soit que de 7 par groupe (5 groupes au total), cette étude suggère que ce ne sont pas les infrasons et basses fréquences sonores mais les vibrations de forte accélération (1,16 g) qui sont responsables des modifications au niveau cellulaire. Ces modifications cellulaires pourraient être à l'origine des modifications structurales observées par les équipes impliquant les IBF et les vibrations dans la VAD. Cependant, si l'effet des vibrations d'accélération élevée dans les modifications de la matrice extra cellulaire reste à confirmer, les vibrations émises par les éoliennes et transmises par le sol n'atteignent pas ces niveaux.

Notes

Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr / @Anses_fr

ISBN 979-10-286-0151-5 - Dépôt légal : mars 2017 - © Anses Éditions : mars 2017 - Date de publication : mars 2017 - Couverture : Parimage (création), Anses (réalisation) - Crédit photo : iStock