Compréhension des données : Bruit des éoliennes

Le comité d'experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine

Council of Canadian Academies
Conseil des académies canadiennes

Le savoir au service du public

COMPRÉHENSION DES DONNÉES : BRUIT DES ÉOLIENNES

Le comité d’experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine

LE CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES
180, rue Elgin, bureau 1401, Ottawa (Ontario) Canada K2P 2K3

Avis : Le projet sur lequel porte ce rapport a été entrepris avec l'approbation du conseil des gouverneurs du Conseil des académies cana diennes (CAC). Les membres du conseil des gouverneurs sont issus de la Société royale du Canada (SRC), de l'Académie canadienne du génie (ACG) et de l'Académie canadienne des sciences de la santé (ACSS), ainsi que du grand public. Les membres du comité d'experts responsable du rapport ont été choisis par le CAC en raison de leurs compétences spécifiques et dans le but d'obtenir un éventail équilibré de points de vue.

Ce rapport a été préparé pour le gouvernement du Canada, en réponse à la demande du Ministre de la Santé. Les opinions, constatations et conclusions présentées dans cette publication sont celles des auteurs, à savoir les membres du comité d'experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine, et ne reflètent pas nécessairement les points de vue des organisations où ils travaillent ou auxquelles ils sont affiliés.

ISBN : 978-1-926522-08-1

Ce rapport peut être cité comme suit :
Conseil des académies canadiennes, 2015. *Compréhension des données : Bruits des éoliennes.* Ottawa, ON : Le comité d'experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine, Conseil des académies canadiennes.

Avis de non-responsabilité : Au meilleur de la connaissance du CAC, les données et les informations tirées d'Internet qui figurent dans le présent rapport étaient exactes à la date de publication du rapport. En raison de la nature dynamique d'Internet, des ressources gratuites et accessibles au public peuvent subséquemment faire l'objet de restrictions ou de frais d'accès, et l'emplacement des éléments d'information peut changer lorsque les menus et les pages Web sont modifiés.

© 2015 Conseil des académies canadiennes

Imprimé à Ottawa, Canada

Council of Canadian Academies
Conseil des académies canadiennes

Canada Cette évaluation a été rendue possible grâce au soutien du gouvernement du Canada.

Le Conseil des académies canadiennes

Le savoir au service du public

Le Conseil des académies canadiennes (CAC) est un organisme indépendant à but non lucratif qui soutient des évaluations spécialisées indépendantes, étayées scientifiquement et faisant autorité, qui alimentent l'élaboration de politiques publiques au Canada. Dirigé par un conseil de 12 gouverneurs et conseillé par un comité consultatif scientifique de 16 membres, le CAC a pour champ d'action la « science » au sens large, ce qui englobe les sciences naturelles, les sciences humaines et sociales, les sciences de la santé, le génie et les lettres. Les évaluations du CAC sont effectuées par des comités pluridisciplinaires indépendants d'experts provenant du Canada et de l'étranger. Ces évaluations visent à cerner des problèmes nouveaux, des lacunes de nos connaissances, les atouts du Canada, ainsi que les tendances et les pratiques internationales. Ces études fournissent aux décideurs gouvernementaux, aux universitaires et aux parties prenantes l'information de grande qualité dont ils ont besoin pour élaborer des politiques publiques éclairées et innovatrices.

Tous les rapports d'évaluation du CAC sont soumis à un examen formel. Ils sont publiés en français et en anglais, et mis à la disposition du public sans frais. Des fondations, des organisations non gouvernementales, le secteur privé et tout palier de gouvernement peuvent soumettre au CAC des questions susceptibles de faire l'objet d'une évaluation. Le CAC bénéficie aussi du soutien de ses trois académies membres fondatrices :

La Société royale du Canada (SRC) est le principal organisme national regroupant d'éminents scientifiques, chercheurs et gens de lettres au Canada. La SRC a pour objectif premier de promouvoir l'acquisition du savoir et la recherche en arts et en sciences. La Société est composée de près de 2 000 membres, hommes et femmes, choisis par leurs pairs pour leurs réalisations exceptionnelles en sciences naturelles, en sciences sociales, en sciences humaines et dans les arts. La SRC s'attache à reconnaître l'excellence universitaire, à conseiller les gouvernements et les organisations, ainsi qu'à promouvoir la culture canadienne.

L'Académie canadienne du génie (ACG) est l'organisme national par l'entremise duquel les ingénieurs les plus chevronnés et expérimentés du Canada offrent au pays des conseils stratégiques sur des enjeux d'importance primordiale. Fondée en 1987, l'ACG est un organisme indépendant, autonome et à but non lucratif. Les membres de l'ACG sont nommés et élus par leurs pairs en reconnaissance de leurs réalisations exceptionnelles et de leurs longs états de service au sein

de la profession d'ingénieur. Au nombre d'environ 600, les membres de l'ACG s'engagent à faire en sorte que les connaissances expertes en génie du Canada soient appliquées pour le plus grand bien de tous les Canadiens.

L'Académie canadienne des sciences de la santé (ACSS) reconnaît les personnes qui ont à leur actif de grandes réalisations dans le domaine des sciences de la santé au Canada. Fondée en 2004, l'ACSS compte quelque 400 membres et en élit de nouveaux chaque année. L'organisation est dirigée par un conseil d'administration et un comité exécutif bénévoles. La première fonction de l'ACSS consiste à fournir en temps opportun des évaluations éclairées et impartiales sur des questions urgentes qui touchent la santé des Canadiens et des Canadiennes. L'ACSS surveille également les événements mondiaux reliés à la santé, afin d'améliorer l'état de préparation du Canada en la matière, et assure une représentation du pays en sciences de la santé sur le plan international. L'ACSS fait autorité au nom de la collectivité multidisciplinaire des sciences de la santé.

www.sciencepourlepublic.ca
@scienceadvice

Le comité d'experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine

Tee L. Guidotti (président), titulaire de la Chaire de chercheur invité de Fulbright, Institut de recherche sur la science, la société et la politique publique, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

Hugh W. Davies, professeur agrégé, santé du travail et de l'environnement, École de santé des populations et de santé publique, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

Yves Gagnon, professeur, génie, Université de Moncton (Edmundston, N.-B.); professeur auxiliaire, génie mécanique, École de technologie supérieure (Montréal, Qc)

Christian Giguère, professeur, Audiologie et pathologie de la parole, École des sciences de la réadaptation, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

Sheryl Grace, professeure agrégée, Département de génie aérospatial et mécanique, Université de Boston (Boston, MA)

Robert Harrison, vice-président de recherche et professeur, Département d'otorhinolaryngologie, chirurgie de la tête et du cou; professeur, Département de physiologie, Institut des biomatériaux et de génie biomédical, Université de Toronto; scientifique principal, Programme de neurosciences et de santé mentale, Hospital for Sick Children (Toronto, Ont.)

Brian Howe, président, HGC Engineering (Toronto, Ont.)

David A. Johnson, professeur, Département de génie mécanique et mécatronique, Université de Waterloo (Waterloo, Ont.)

Kerstin Persson Waye, professeure, Médecine du travail et de l'environnement, Université de Göteborg, (Göteborg, Suède)

Jennifer D. Roberts, professeure adjointe, Sciences de la santé du travail et de l'environnement, École de médecine F. Edward Hébert, Département de médecine préventive et de biométrie (Division des sciences de la santé du travail et de l'environnement), Uniformed Services University of the Health Sciences (Bethesda, MD)

Message du président

Les éoliennes sont un ajout relativement récent au paysage et au panier énergétique canadiens. Bien que l'énergie éolienne sous forme de moulins à vent soit une réalité commune sur les fermes et dans les Prairies, l'exploitation d'éoliennes à l'échelle commerciale est un phénomène moderne. Leur expansion récente en taille et en nombre a soulevé des questions quant à leurs effets potentiels sur la santé des résidents à proximité.

En réponse aux préoccupations du public, le gouvernement du Canada, par l'entremise du ministre de la Santé, a demandé au Conseil des académies canadiennes de déterminer s'il existe des preuves d'un lien causal entre l'exposition au bruit des éoliennes et des effets sur la santé.

Ce rapport présente l'expertise et les contributions d'un comité de 10 experts du Canada et de l'étranger, provenant de domaines aussi divers que l'ingénierie et la science médicale, dont moi-même à titre de président. Je suis extrêmement reconnaissant envers mes collègues du comité d'experts qui n'ont pas ménagé leur temps et leurs efforts pour assurer la qualité et la profondeur de ce rapport. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude aux neuf examinateurs qui ont assisté le comité d'experts et dont les efforts ont considérablement amélioré la version antérieure du rapport.

Avant la création du comité d'experts, Santé Canada avait entrepris, en 2012, une vaste étude épidémiologique transversale pour mesurer les effets potentiels sur la santé de l'exposition au son des éoliennes dans les régions du pays où l'énergie éolienne est utilisée. Les résultats préliminaires de cette étude sont devenus disponibles au moment où le comité concluait ses délibérations et mettait la dernière main au présent rapport (novembre 2014). Bien que les résultats de l'étude n'aient pas été inclus dans l'ensemble de la preuve évaluée

par le comité, ils sont résumés et commentés brièvement dans un encadré du rapport. Je tiens à assurer les lecteurs que Santé Canada n'a ni participé ni eu accès aux délibérations du comité d'experts, ni n'a pris connaissance des ébauches du présent rapport avant sa publication.

Enfin, le comité d'experts est reconnaissant de l'appui qu'il a reçu des membres du personnel du Conseil des académies canadiennes affectés à cette évaluation. Ils forment une équipe dévouée et compétente d'universitaires et de professionnels, et ce fut un honneur et un plaisir pour moi de travailler avec eux.

Je tiens à témoigner mon appréciation personnelle aux membres du comité d'experts pour leur collaboration, ainsi que la rigueur, la patience et le dévouement dont ils ont fait preuve dans leur travail.

Tee L. Guidotti
Président, comité d'experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine

Personnel responsable du projet au Conseil des académies canadiennes

Équipe de l'évaluation : Emmanuel Mongin, directeur adjoint de programmes
Stefan Jungcurt, associé de recherche
Jonathan Whiteley, associé de recherche
Tess Lin, coordonnatrice de programmes
Weronika Zych, coordonnatrice de programmes
Naomi Shuman, stagiaire

Avec la participation de : Leela Steiner, consultante
Carolyn Brown, révision de l'anglais
Jody Cooper, révision de l'anglais
Accurate Design & Communication Inc., conception graphique

Examen du rapport

Ce rapport a été examiné, à l'état d'ébauche, par les personnes mentionnées ci-dessous. Celles-ci ont été choisies par le Conseil des académies canadiennes pour refléter une diversité de points de vue, de domaines de spécialisation et d'origines, dans les secteurs des établissements universitaires, de l'entreprise privée, des politiques et des organisations non gouvernementales.

Ces examinateurs ont évalué l'objectivité et la qualité du rapport. Leurs avis — qui demeureront confidentiels — ont été pleinement pris en considération par le comité d'experts, et un grand nombre de leurs suggestions ont été incorporées dans le rapport. Nous n'avons pas demandé à ces personnes d'approuver les conclusions du rapport, et elles n'ont pas vu la version définitive du rapport avant sa publication. Le comité d'experts qui a effectué l'évaluation et le Conseil des académies canadiennes assument l'entière responsabilité du contenu définitif de ce rapport.

Le CAC tient à remercier les personnes suivantes d'avoir bien voulu examiner le rapport :

Prudence Allen, directrice et professeure agrégée, National Centre for Audiology, Université Western (London, Ont.)

François Benoit, responsable scientifique et administratif, Centre de collaboration nationale sur les politiques publiques et la santé, Institut national de santé publique du Québec (Montréal, Qc)

Arline L. Bronzaft, consultante et professeure émérite, Université de New York (New York, NY)

Jeffrey M. Ellenbogen, professeur adjoint de neurologie, Université Johns Hopkins (Baltimore, MD)

Wendy Heiger-Bernays, professeure agrégée de santé environnementale, École de santé publique, Université de Boston (Boston, MA)

Stefan Oerlemans, expert principal en aéroacoustique, Siemens Wind Power (Brande, Danemark)

Stéphane Perron, médecin et professeur-clinicien adjoint, Département de santé publique de Montréal, Université de Montréal et Université McGill (Montréal, Qc)

Bo Søndergaard, consultant principal, Département d'acoustique, Grontmij (Aarhus, Danemark)

Jian Wang, professeur titulaire, École des troubles de communication humaine, Université Dalhousie (Halifax, N.-É.)

La procédure d'examen du rapport a été supervisée, au nom du conseil des gouverneurs et du comité consultatif scientifique du CAC, par **Susan A. McDaniel, MSRC,** directrice de l'Institut Prentice; titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur la population mondiale et le cours de la vie; titulaire de la chaire de recherche Prentice en démographie et économie mondiales; professeure de sociologie, Université de Lethbridge (Lethbridge, Alb.). Son rôle était de veiller à ce que le comité d'experts prenne en considération de façon entière et équitable les avis des examinateurs. Le conseil des gouverneurs du CAC n'autorise la publication du rapport d'un comité d'experts qu'une fois que la personne chargée de superviser l'examen du rapport confirme que le rapport satisfait bien aux exigences du CAC. Le CAC remercie Mme McDaniel d'avoir supervisé consciencieusement l'examen du rapport.

Janet W. Bax, Présidente par intérim,
Conseil des académies canadiennes

Sommaire

La demande d'énergie renouvelable, y compris l'énergie éolienne, devrait continuer à croître, tant au Canada qu'à l'échelle mondiale, dans un avenir prévisible. Le secteur canadien de l'énergie éolienne s'est développé à un rythme de plus en plus rapide depuis les années 1990, et le Canada est aujourd'hui le cinquième plus grand marché mondial pour ce qui est de l'installation de nouvelles éoliennes. Alors que se poursuit la croissance de ce secteur, les éoliennes installées deviennent de plus en plus puissantes. Les premières turbines à l'échelle du mégawatt ont été installées au Canada en 2004 et les modèles de 3 mégawatts sont arrivés en 2008; de plus grands modèles, allant jusqu'à 7,5 mégawatts, sont actuellement à l'essai à l'échelle internationale. Pour produire cette puissance, les turbines ont également progressé en taille. Comme les éoliennes deviennent une caractéristique plus répandue dans le paysage canadien, cette nouvelle source de son ambiant a soulevé des préoccupations quant aux effets potentiels sur la santé des résidents établis à proximité.

Il est donc important de déterminer si l'énergie éolienne provoque des effets néfastes sur la santé des gens afin que tous les Canadiens puissent partager équitablement des avantages de cette technologie.

LE MANDAT CONFIÉ AU COMITÉ D'EXPERTS

En réponse à la préoccupation croissante du public concernant les effets potentiels sur la santé du bruit des éoliennes, le gouvernement du Canada, par l'entremise du ministre de la Santé (le commanditaire), a demandé au Conseil des académies canadiennes (CAC) d'effectuer une évaluation de la question suivante :

Avons-nous des preuves reliant l'exposition au bruit des éoliennes à des effets néfastes sur la santé?

Le mandat comprend également les sous-questions suivantes :

- *Quelles lacunes doit-on combler dans les connaissances scientifiques et technologiques afin de permettre une évaluation complète des incidences possibles sur la santé du bruit produit par les éoliennes?*
- *Le risque potentiel pour la santé humaine est-il suffisamment plausible pour justifier d'autres recherches sur l'association entre l'exposition au bruit des éoliennes et des effets néfastes sur la santé?*
- *Comment le Canada se compare-t-il internationalement quant à la prévalence et à la nature des effets néfastes sur la santé des populations vivant à proximité d'installations éoliennes commerciales?*

- *Quelles technologies ou pratiques exemplaires utilisées dans d'autres pays pourraient être envisagées au Canada afin de diminuer les réactions négatives de la population au bruit des éoliennes?*

Le comité d'experts a défini la *santé* d'une manière compatible avec la notion de la santé employée par l'Organisation mondiale de la Santé, soit « un état de bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité » (OMS, 1946). Le comité d'experts a interprété le *bruit* en y incluant à la fois des mesures objectives des signaux acoustiques dans l'environnement (le *son*) et les perceptions subjectives de sensations sonores non désirées par l'auditeur (le *bruit*). Comme il y a une variété d'éoliennes installées dans le monde ayant différentes caractéristiques sonores, le comité a porté son attention spécifiquement sur le type qui représente la quasi-totalité des turbines installées au Canada : les éoliennes modernes, tripales, montées sur une tour, à échelle utilitaire (capacité de 500 kilowatts ou plus), faisant face au vent, à axe horizontal et installées à terre.

L'APPROCHE DU COMITÉ D'EXPERTS

Pour s'acquitter de son mandat, le comité d'experts a employé une approche fondée sur des données probantes afin de recenser et d'examiner les recherches pertinentes. Dans un premier temps, le comité d'experts a identifié plus de 30 symptômes et effets sur la santé attribués à l'exposition au bruit des éoliennes, au terme d'une vaste revue des écrits soumis à l'évaluation des pairs et de la littérature grise, des pages Web et des décisions judiciaires sur la question.

Des données empiriques liées à tout lien entre ces effets sur la santé et l'exposition au bruit des éoliennes ont ensuite été recueillies à plusieurs sources, notamment des articles parus dans des revues soumises à l'évaluation des pairs, des documents de conférence et la littérature grise. Plus de 300 publications sont ressorties de cette recherche exhaustive et elles ont été ramenées à 38 études pertinentes traitant des effets sur la santé du bruit des éoliennes. L'ensemble de la preuve pour chaque effet sur la santé a été étudié et évalué selon les lignes directrices de Bradford Hill pour la causalité, et résumé en employant les termes standards adoptés par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC). Les principales étapes de l'approche du comité d'experts sont illustrées à la figure 1.

PRINCIPALES CONCLUSIONS

En se fondant sur son expertise et l'évaluation qu'il a faite de la recherche empirique, le comité d'experts a tiré des conclusions dans les domaines suivants :

- Les caractéristiques acoustiques du bruit des éoliennes;
- la preuve de liens de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et les effets néfastes sur la santé;

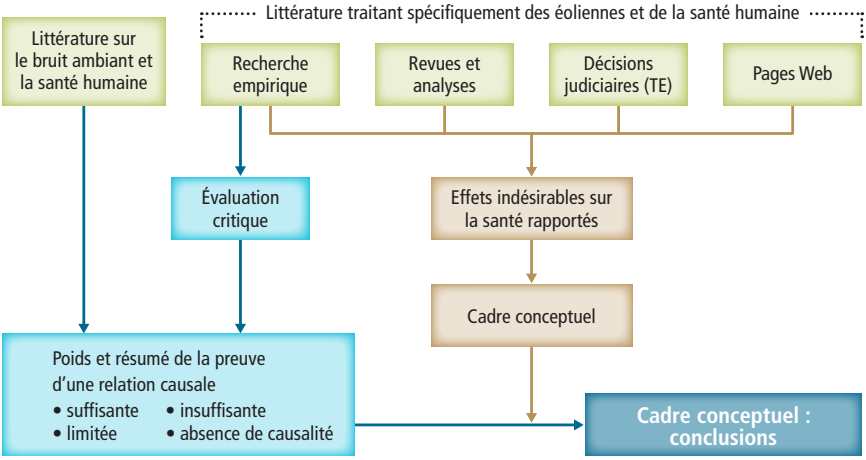


Figure 1

Processus d'évaluation de l'information disponible

Les lignes brunes montrent l'information utilisée dans la définition des effets potentiels sur la santé et la construction d'un modèle des mécanismes pathogènes; les lignes bleues plus épaisses montrent le processus d'examen de la littérature pertinente aux liens de causalité entre le bruit des éoliennes et chaque effet potentiel sur la santé.

- le manque de connaissances et de recherches plus poussées;
- les pratiques prometteuses pour atténuer la réaction défavorable de la collectivité.

D'autres aspects du mandat, tels que la prévalence des effets néfastes sur la santé au Canada, sont demeurés sans réponse en raison d'un manque de données.

CARACTÉRISTIQUES ACOUSTIQUES DU BRUIT DES ÉOLIENNES

1. Le son émis par les éoliennes est complexe et variable.

Comme le son provenant de n'importe quelle source, le bruit des éoliennes peut être décrit par des composantes de fréquence (qui en déterminent la hauteur tonale), les niveaux de pression acoustique (qui en déterminent *l'intensité*), et la façon dont ces deux caractéristiques changent avec le temps. Le son émis par les éoliennes est hautement complexe et variable, mais il possède certaines caractéristiques qui sont similaires à d'autres sources de bruit ambiant, tels que la circulation routière et aéroportuaire :

- Le son émis par les éoliennes est *à large bande*, constitué de sons émis sur une large plage de fréquences.

- Les niveaux globaux de pression acoustique à l'extérieur varient considérablement en fonction de la distance, de la vitesse du vent et la transmission de la source au récepteur.
- Cependant, les fréquences plus élevées ont tendance à être réduites à l'intérieur et avec l'éloignement, conduisant à une plus grande prévalence des basses fréquences.
- Ce son est modulé en amplitude, les niveaux sonores changeant au fil du temps.

Les éoliennes émettent également un son ayant les caractéristiques suivantes, qui sont moins communes que pour les autres sources de bruit dans la collectivité :

- Les sons provenant des éoliennes peuvent descendre jusque dans la gamme infrasonore et, dans certains cas, présenter des pointes ou des composantes tonales à basses fréquences.
- Les émissions sonores d'une éolienne augmentent avec la vitesse du vent à la hauteur des pales, jusqu'à la *vitesse cotée du vent* de la turbine (la vitesse à laquelle celle-ci génère la puissance maximale), au-dessus de laquelle le son n'augmente pas.
- Le son émis par les éoliennes peut présenter une *modulation d'amplitude* périodique, souvent décrite comme un « sifflement » ou un son « sourd ». Les causes et les conséquences de cette modulation d'amplitude périodique font actuellement l'objet de recherches; les concepteurs et les fabricants de turbines éoliennes cherchent par ailleurs des moyens de la réduire ou de l'atténuer.

La plus grande partie du son émis par une éolienne résulte des interactions de la surface de la pale et de l'air qui s'y écoule (processus aérodynamiques), qui est le plus fort près — mais pas aux — extrémités des pales. Le bruit mécanique des mouvements physiques de la boîte de vitesses, de la génératrice et d'autres composantes produit des tonalités de basse fréquence dans certains cas.

2. Les méthodes standard de mesure du son peuvent ne pas capter le son à basse fréquence et la modulation d'amplitude caractéristiques du bruit d'une éolienne.

La mesure du son aux fins de la surveillance de la santé et de la recherche fait appel à des méthodes standard. Les méthodes les plus couramment employées sont la pondération en gamme A, qui donne plus d'importance aux fréquences correspondant au registre de sensibilité de l'oreille humaine, et moins d'importance aux fréquences basses et très élevées. Bien que la mesure pondérée en gamme A soit une méthode essentielle, elle peut ne pas capter les composantes de basse fréquence du son des éoliennes. En outre, la mesure

correspond souvent à une moyenne temporelle (L_{eq}) qui ne rend pas compte des changements dans le niveau de pression acoustique se produisant sur de courts intervalles (par exemple, en moins d'une seconde). Il se peut donc que la mesure temporelle moyenne ne saisisse pas la modulation d'amplitude.

Les mesures pondérées en gamme A sont une première étape importante dans la détermination de l'exposition des gens au son audible dans la plupart des cas, mais des mesures plus détaillées peuvent être nécessaires pour permettre aux chercheurs d'étudier de manière approfondie les effets potentiels sur la santé de sources spécifiques de bruit provenant des éoliennes. Toutefois, les mesures de l'exposition sonore les plus pertinentes en ce qui a trait aux effets potentiels sur la santé ne sont pas complètement comprises et demeurent un important domaine de recherche pour l'avenir.

LE BRUIT DES ÉOLIENNES ET LES EFFETS NÉFASTES SUR LA SANTÉ

Les données empiriques pertinentes ont été examinées et pondérées afin de déterminer la robustesse de la preuve d'un lien de causalité entre le bruit des éoliennes et chacun des effets néfastes potentiels sur la santé.

3. La preuve est suffisante pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et un *dérangement*.

La preuve démontre systématiquement une relation positive entre le niveau de bruit des éoliennes en plein air et la proportion des personnes qui déclarent des niveaux élevés de dérangement. Cependant, de nombreux facteurs peuvent agir sur la force de ce lien, tels que les attitudes d'une personne envers les éoliennes et tout avantage économique qu'elle retire de celles-ci. En outre, les effets visuels et sonores des éoliennes sont difficiles à départager. L'état actuel des données ne permet pas de tirer de conclusion définitive sur la possibilité que le dérangement soit causé seulement par l'exposition au bruit des éoliennes, ou si des facteurs tels que l'impact visuel et les attitudes personnelles influent sur le rapport bruit-dérangement — et dans quelle mesure — puisque les études réalisées à ce jour ne mesurent pas ces facteurs indépendamment les uns des autres. Il est également difficile de dire quelles caractéristiques sonores contribuent au dérangement chronique à long terme, quoique les composantes à basse fréquence et la modulation d'amplitude périodique aient été étudiées comme facteurs probables.

4. Il y a des données limitées pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du *sommeil*.
Les données disponibles laissent penser qu'il pourrait y avoir un lien de causalité direct ou indirect (par le biais du dérangement) entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil. Bien que la perturbation du sommeil ait été examinée dans plusieurs études, la base de données qui en découle est plus limitée que celle qui a servi à examiner la relation entre le bruit des éoliennes et le dérangement.

5. Les données semblent indiquer qu'il n'y a pas de lien de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et la *perte auditive*.
Il existe des données convaincantes établissant que l'exposition au bruit des éoliennes à des niveaux correspondant à la réglementation sur les limites de bruit et l'éloignement (distance des structures) ne provoque pas de perte d'audition, même pour une exposition sur une durée de vie entière.

6. Le comité d'experts a relevé des preuves insuffisantes d'un lien direct de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et le *stress*, bien que le stress ait été relié à d'autres sources de bruit dans la collectivité.
Les données disponibles indiquent qu'un mécanisme direct ou indirect entre l'exposition au bruit des éoliennes et le stress pourrait exister, semblable à celui observé pour les troubles du sommeil, mais la preuve manque de robustesse méthodologique et statistique. Le *stress* a été identifié comme facteur de risque pour un certain nombre d'autres maladies, comme les maladies cardiovasculaires, dans le contexte de l'exposition à long terme au son ambiant provenant d'autres sources, telles que la circulation routière, ferroviaire et aérienne. Les données actuelles sur l'exposition au bruit des éoliennes et le stress ne sont toutefois pas cohérentes.

7. *Pour tous les autres effets sur la santé examinés* (fatigue, acouphène, vertige, nausée, étourdissement, maladie cardiovasculaire, diabète, etc.), la preuve est insuffisante pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence d'un lien de causalité avec l'exposition au bruit des éoliennes.
L'hypertension et d'autres maladies cardiovasculaires, le diabète, l'acouphène, la performance cognitive ou exécutive, la santé psychologique et la qualité de vie liée à la santé ont tous fait l'objet d'études de population empiriques axées sur le bruit des éoliennes. Cependant, les données ne sont pas cohérentes ou les études comportent des limites méthodologiques qui empêchent d'établir un lien de causalité entre ces effets et l'exposition au bruit des éoliennes.

Aucun des autres effets sur la santé considérés n'a fait l'objet d'études ou d'expériences au niveau de la population dans l'optique du bruit des éoliennes. Par conséquent, les données sur un éventuel lien de causalité sont largement absentes pour ce qui est de ces autres effets.

Les conclusions sur les liens de causalité font donc défaut pour la plupart des effets sur la santé postulés dans une grande variété de sources examinées par le comité d'experts, principalement en raison du manque de données probantes ou de problèmes de qualité des données. Cependant, la recherche sur le bruit ambiant a montré que le dérangement peut être un facteur contributif ou un précurseur des effets néfastes sur la santé, comme les troubles du sommeil, le stress et les maladies cardiovasculaires. Ainsi, le comité a élaboré un cadre conceptuel des voies par lesquelles le son provenant des éoliennes pourrait avoir des effets plausibles sur la santé. La figure 2 illustre ce cadre et résume les constatations du comité d'experts sur les voies causales possibles entre l'exposition au bruit des éoliennes et l'apparition d'effets néfastes sur la santé ou l'aggravation de l'état de santé existant.

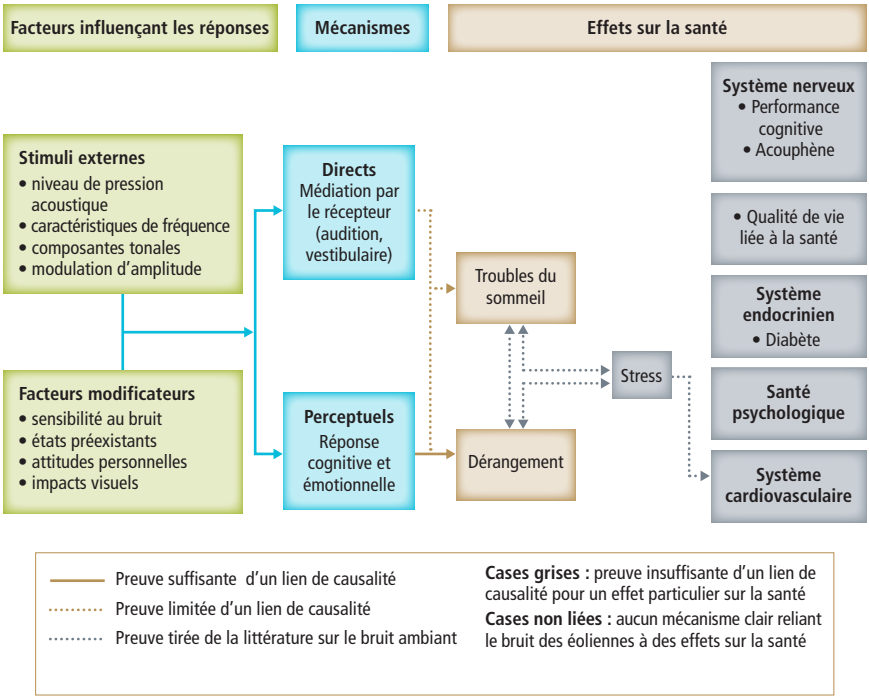


Figure 2

Résumé de l'information pertinente aux voies de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et les effets indésirables sur la santé

LACUNES DANS LES CONNAISSANCES ET RECHERCHES PLUS POUSSÉES

8. Les lacunes dans les connaissances empêchent de faire une évaluation complète des effets sur la santé publique du bruit des éoliennes.

Le comité d'experts a cerné des lacunes particulières dans les connaissances pour chaque état de santé étudié, où des types de données spécifiques aideraient à préciser la force des liens, à réduire au minimum les biais, ou à écarter les facteurs de confusion possibles sur l'exposition au bruit des éoliennes. À titre d'exemple, il est difficile de savoir si la voie qui pourrait conduire à des troubles du sommeil ou de stress est la conséquence directe de l'exposition au bruit des éoliennes ou du dérangement en tant que facteur de médiation.

La plupart des études épidémiologiques existantes sur le bruit des éoliennes n'ont pas une robustesse suffisante pour détecter de petits changements dans les risques d'effets néfastes sur la santé, ou ont été conçues d'une manière qui ne pouvait pas exclure la présence d'un biais dans les réponses ou neutraliser adéquatement les facteurs de confusion. Le comité d'experts a également relevé l'absence d'études longitudinales. Le comité attire l'attention sur le manque de recherches sur les populations sensibles, comme les enfants et les nourrissons et les personnes atteintes de troubles cliniques qui peuvent accroître la sensibilité au son.

L'utilisation de méthodes et de procédures adéquates de mesure et de modélisation de l'exposition au son des éoliennes, en particulier à l'intérieur, permettrait d'améliorer la qualité des études futures consacrées aux effets néfastes sur la santé (voir la principale conclusion 2).

9. La recherche sur l'exposition à long terme au bruit des éoliennes permettrait de mieux comprendre les liens de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et certains effets néfastes sur la santé.

Le dérangement chronique et les troubles du sommeil ont été liés à des réactions de stress dans les études sur l'exposition à long terme à d'autres sources de bruit, comme la circulation aérienne et routière. En outre, ces effets sur la santé sont eux-mêmes des facteurs de risque pour d'autres maladies, comme les maladies cardiovasculaires, qui ont déjà été associés à l'exposition à long terme à d'autres sources de bruit environnant. Compte tenu du fardeau des maladies cardiovasculaires sur la société et le système de soins de santé au Canada, de nouvelles recherches sur les effets à long terme de l'exposition au bruit des éoliennes, notamment sur le stress et les troubles du sommeil, produiraient davantage de données pour évaluer les effets sur la santé du bruit des éoliennes. Enfin, le comité souligne que les données disponibles ne

permettent pas de tirer de conclusions sur la prévalence du dérangement ou d'autres effets sur la santé au sein de la population exposée au son des éoliennes au Canada. Des recherches et une surveillance plus poussées permettront de mieux comprendre cette prévalence, chez les personnes exposées au bruit des éoliennes et dans la population en général.

PRATIQUES ET TECHNOLOGIES PROMETTEUSES POUR ATTÉNUER LA RÉACTION DÉFAVORABLE DE LA COLLECTIVITÉ AU BRUIT DES ÉOLIENNES

10. À court terme, le développement technologique ne résoudra probablement pas les enjeux actuels liés aux effets néfastes perçus sur la santé du bruit des éoliennes.

Les fabricants d'éoliennes étudient à l'heure actuelle des modèles, des modifications et des technologies qui pourraient permettre de réduire les émissions sonores de ces appareils. Les développements technologiques constants ont contribué à réduire les émissions sonores pour des éoliennes de taille donnée par rapport à la génération précédente, et d'autres améliorations sont attendues. D'autres facteurs tels que la puissance de sortie favorisent cependant les éoliennes de plus grande taille, ce qui pourrait annuler en partie les réductions globales des émissions sonores par kilowatt d'électricité produite.

11. Les études d'impact et l'engagement communautaire fournissent aux collectivités de plus grandes connaissances et un meilleur contrôle sur les projets d'énergie éolienne et permettent de limiter le dérangement.

L'équité et la justice ont été des aspects essentiels de l'acceptation des éoliennes dans de nombreuses collectivités, et la perte perçue de justice sociale et la marginalisation constituent des obstacles importants à l'acceptation dans certains cas. Une importante approche réglementaire est de procéder à une évaluation de l'impact du bruit de tout projet; plusieurs provinces canadiennes et d'autres pays exigent une telle évaluation. Dans certaines des pratiques internationales examinées par le comité d'experts, les promoteurs de projets d'éoliennes ont engagé des consultations et communiqué avec les autorités locales et les résidents à un stade précoce du projet, durant toutes les étapes de la mise en œuvre, et même une fois l'installation terminée. L'engagement communautaire permet d'informer et d'éduquer les résidents de la localité et de les impliquer dans le projet d'énergie éolienne de manière à favoriser l'acceptation sociale.

Les éoliennes sont progressivement devenues un spectacle familier au Canada et elles fournissent une part croissante de l'électricité consommée au Canada. Les inquiétudes au sujet des effets du bruit des éoliennes sur la santé ont été exprimées de bien des façons, mais rarement avec des données détaillées, reproductibles et rigoureuses suffisantes pour soutenir une conclusion sur la causalité ou l'ampleur de tout effet potentiel sur la santé. Le rapport final du comité d'experts tente de faire un examen objectif et rigoureux de la recherche empirique sur le lien de causalité entre le bruit des éoliennes et les effets néfastes sur la santé, ainsi que des solutions possibles aux problèmes liés au bruit envisagées ailleurs et qui pourraient aider à répondre aux préoccupations entourant le bruit des éoliennes au Canada. Le rapport est destiné non seulement à servir d'outil pour éclairer la prise de décision et la recherche universitaire sur cette question, mais aussi la poursuite du dialogue au pays et à l'étranger, et dans de nombreux secteurs, sur le bruit des éoliennes et les effets indésirables sur la santé humaine.

Table des matières

1 Introduction 1
1.1 Mandat du comité d'experts 3
1.2 Interprétation du mandat 3
1.3 Étude de Santé Canada sur le bruit des éoliennes et la santé 5
1.4 Structure du rapport 6

2 Contexte de l'énergie éolienne 7
2.1 Conception des turbines éoliennes 9
2.2 Contextes canadien et international 15
2.3 Surveillance de la santé 18
2.4 Limites de bruit et éloignement 19
2.5 Résumé du chapitre 20

3 Propriétés acoustiques des éoliennes 22
3.1 Principes de base de l'acoustique 24
3.2 Différentes sources sonores liées aux éoliennes 36
3.3 Niveaux et spectres sonores des éoliennes 38
3.4 Résumé du chapitre 44

4 Audition et perception du son 46
4.1 Voie auditive 48
4.2 Voies non auditives 49
4.3 Perception et mécanismes auditifs fondamentaux 50
4.4 Perception du son 53
4.5 Résumé du chapitre 54

5 Évaluations de la preuve 55
5.1 Revues récentes des écrits sur le bruit des éoliennes et la santé 57
5.2 Effets néfastes sur la santé proposés 58
5.3 Prévalence des effets sur la santé signalés et plaintes liées au bruit au Canada 61
5.4 Cadre conceptuel pour les effets sur la santé postulés 62
5.5 Données probantes concernant le bruit des éoliennes et la santé humaine 63
5.6 Soupeser et résumer la preuve 67
5.7 Résumé du chapitre 69

6 Preuves actuelles concernant les effets néfastes du bruit des éoliennes sur la santé 70
6.1 Dérangement 72
6.2 Perturbation du sommeil 80
6.3 Stress 85
6.4 Maladies cardiovasculaires 88
6.5 Diabète 91
6.6 Effets sur l'audition 93
6.7 Acouphènes 94
6.8 Effets des sons inaudibles sur l'oreille interne 95
6.9 Performance cognitive et mentale 99
6.10 Santé psychologique 101
6.11 Qualité de vie 102
6.12 Autres effets sur la santé 103
6.13 Résumé du chapitre 104

7 Résumé de la preuve, des lacunes dans les connaissances et des besoins de recherche 105
7.1 Résumé de la preuve 106
7.2 Qualité des preuves examinées 112
7.3 Autres recherches nécessaires 114
7.4 Résumé du chapitre 116

8 Pratiques prometteuses 117
8.1 Technologies de conception 118
8.2 Pratiques prometteuses pour la surveillance du bruit 121
8.3 Acceptation croissante 125
8.4 Résumé du chapitre 129

9 Conclusions 131
9.1 Réflexions finales 137

Glossaire 138

Références 144

1

Introduction

- Mandat du comité d'experts
- Interprétation du mandat
- Étude de Santé Canada sur le bruit des éoliennes et la santé
- Structure du rapport

1 Introduction

L'éolien est de plus en plus considéré comme une source viable d'énergie renouvelable qui n'émet pas de gaz à effet de serre en période d'exploitation et dont l'empreinte environnementale est limitée. À l'échelle mondiale, la puissance électrique installée d'origine éolienne atteignait au total près de 320 gigawatts (GW) en 2013, dont plus de 35 GW de nouvelle puissance en cette seule année (GWEC, 2014). Au Canada, la puissance éolienne totale installée s'élevait à 9,2 GW à la fin de 2014, répartie sur plus de 206 projets éoliens comptant au total plus de 5 114 turbines distinctes (CanWEA, 2014). La demande d'énergie renouvelable et la capacité de production d'électricité d'origine éolienne devraient continuer de croître dans un avenir prévisible.

La capacité de production d'énergie éolienne a augmenté au Canada depuis les années 1990, mais au cours des dernières années, un nombre croissant de personnes et d'organisations se sont dites préoccupées par le fait que le bruit (voir l'encadré 1.1) produit par les éoliennes installées à proximité des résidences puisse représenter un risque pour la santé publique. Les éoliennes sont souvent situées en milieu rural, où l'intensité du son ambiant est faible, ce qui rend le son des éoliennes particulièrement perceptible par les résidents du voisinage. Le son produit par les éoliennes se caractérise par :

- une modulation d'amplitude périodique (un « sifflement » ou un son ou battement « sourd »);
- des changements de niveau sonore imprévisibles, qui dépendent de la vitesse du vent à la hauteur des pales;
- une intensité qui s'élève avec la vitesse du vent à mesure que la hauteur augmente;
- une large plage de fréquences.

Encadré 1.1
Concernant l'utilisation des termes *bruit* et *son* dans ce rapport

Dans le cadre du présent rapport, *son** et *bruit* sont utilisés de façon largement interchangeable, sans distinction de sens. Toutefois, lorsque le comité d'experts décrit un simple signal acoustique (par exemple, pour en définir les propriétés acoustiques, c'est-à-dire avant qu'il soit traité sur le plan cognitif), c'est le terme *son*, plus neutre, qui est employé. Lorsque le comité décrit un *son* traité sur le plan cognitif et pouvant être considéré comme déplaisant ou non désiré, c'est le terme *bruit* qui est utilisé.

*Les termes et les expressions figurant en italique sont définis dans le glossaire.

1.1 MANDAT DU COMITÉ D'EXPERTS

En mai 2012, le gouvernement du Canada, par l'entremise du ministre de la Santé (le commanditaire), a demandé au Conseil des académies canadiennes (le CAC) de réaliser une évaluation pour répondre à la question suivante :

> *Avons-nous des preuves reliant l'exposition au bruit des éoliennes à des effets néfastes sur la santé?*

Le commanditaire a également posé les sous-questions suivantes au CAC :

> *Quelles lacunes doit-on combler dans les connaissances scientifiques et technologiques afin de permettre une évaluation complète des incidences possibles sur la santé du bruit produit par les éoliennes?*
>
> *Le risque potentiel pour la santé humaine est-il suffisamment plausible pour justifier d'autres recherches sur l'association entre l'exposition au bruit des éoliennes et des effets néfastes sur la santé?*
>
> *Comment le Canada se compare-t-il internationalement quant à la prévalence et à la nature des effets néfastes sur la santé des populations vivant à proximité d'installations éoliennes commerciales?*
>
> *Quelles technologies ou pratiques exemplaires utilisées dans d'autres pays pourraient être envisagées au Canada afin de diminuer les réactions négatives de la population au bruit des éoliennes?*

Afin de trouver des réponses à ces questions, le CAC a réuni 10 experts canadiens et étrangers de domaines pertinents liés à la médecine et au génie pour constituer le comité d'experts sur le bruit des éoliennes et la santé humaine. Ce rapport présente les résultats de leurs délibérations et de leur analyse.

1.2 INTERPRÉTATION DU MANDAT

Un vaste éventail d'effets sur la santé ont été attribués au bruit provenant des éoliennes, non seulement des effets se rapportant à une définition étroite de la santé, mais également certains aspects plus associés au bien-être et à la qualité de vie. Le comité d'experts a par conséquent décidé d'adopter une approche large, qui prend en compte l'ensemble des préoccupations soulevées par le public.

Le comité d'experts a donc choisi d'appuyer ses délibérations sur le concept de la *santé* adopté par l'Organisation mondiale de la santé, soit « un état de bien-être physique, mental et social complet, [qui] ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité » (OMS, 1946). Cette acception se reflète également dans l'approche préconisée par Santé Canada, en vertu de laquelle la santé ne constitue pas un concept objectif, mais un concept qui varie plutôt d'une personne à l'autre et d'une société à l'autre (Santé Canada, 2011). La santé est par conséquent un concept qui reste sujet à interprétation et à discussion. Le comité d'experts reconnaît que les effets sur la santé comprennent des symptômes cliniques ainsi que d'autres effets qui diminuent le bien-être, tels que le dérangement et la perturbation du sommeil.

Ce rapport aborde autant les problèmes de santé qui apparaissent pour la première fois après une exposition au bruit des éoliennes que les états préexistants qui sont aggravés par une telle exposition. Dans plusieurs cas, l'apparition de nouveaux états de santé par suite d'une exposition se détermine en partie en considérant l'état de santé général de la personne avant l'exposition, en particulier les facteurs qui pourraient accroître sa sensibilité au bruit ou au son. Le comité d'experts a d'abord dressé une liste étendue des états de santé, symptômes et autres effets qui ont été attribués au bruit des éoliennes, en se fondant sur plusieurs sources, dont la littérature scientifique, la littérature grise[1], les reportages médiatiques et les décisions judiciaires, de même que sur des sources autopubliées, telles que les sites Web et les blogues. Dans une deuxième étape, le comité d'experts a procédé à un examen structuré d'un éventail de sources pertinentes pour évaluer l'ensemble de la preuve concernant le lien possible entre l'exposition au bruit des éoliennes et les états de santé relevés à la première étape. Dans les cas où les recherches publiées n'avaient pas encore traité d'un effet particulier du bruit des éoliennes sur la santé, ou lorsque les données probantes étaient limitées, le comité d'experts a également considéré les recherches analogues réalisées sur les états de santé attribués à d'autres sources de bruit ambiant. Dans sa méthodologie d'évaluation, le comité d'experts a appliqué plusieurs concepts associés à la santé publique fondée sur des données probantes : une définition structurée du problème, un dépouillement systématique de la littérature et une évaluation critique de la littérature pertinente, basée notamment sur l'utilisation des lignes directrices de Bradford Hill. Ces lignes directrices sont couramment utilisées pour interpréter les données disponibles afin de déterminer s'il existe un lien causal entre une exposition à un facteur de risque potentiel (le bruit des éoliennes, par exemple) et des effets sur la santé (Bradford Hill, 1965).

1 La *littérature grise* s'entend des documents électroniques ou imprimés qui « ne sont pas contrôlés par des éditeurs commerciaux; c.-à-d. que l'édition ne constitue par la principale activité de l'entité productrice » [traduction] (GreyNet International, 2014).

La portée de l'évaluation s'est limitée aux effets sur la santé qui seraient causés par, ou associés avec une exposition au bruit provenant des éoliennes. Ont été exclues du cadre de cette étude les autres sources potentielles d'effets sur la santé, telles que l'effet stroboscopique, les vibrations du sol et les risques encourus au travail par le personnel d'entretien. Le comité d'experts a en outre porté son attention spécifiquement sur les éoliennes face au vent modernes, à échelle utilitaire ou commerciale, soit le type d'installation le plus couramment utilisé dans l'industrie de l'énergie éolienne au Canada et dans le reste du monde.

Au cours des dix dernières années, plusieurs revues ont été réalisées sur l'influence que peut avoir le bruit des éoliennes sur la santé. Le présent rapport, toutefois, diffère de celles-ci sur les plans suivants :

- l'accent est mis sur le contexte canadien, avec des comparaisons à l'échelle internationale, lorsque possible;
- il comprend un examen des effets sur la santé prétendument attribuables au bruit des éoliennes, selon diverses sources (allant des études primaires évaluées par des pairs à des pages Web);
- il s'appuie sur un vaste corpus de données, notamment sur la littérature soumise à l'évaluation des pairs, mais aussi la littérature grise, un livre, une thèse d'études supérieures ainsi que d'autres sources de données directes se rapportant aux éoliennes commerciales, de même que sur la documentation portant plus largement sur les effets biologiques du bruit;
- il identifie les lacunes à combler sur le plan des connaissances ainsi que les axes de recherche qui seraient justifiables considérant la plausibilité soumises des effets néfastes que pourrait avoir le bruit sur la santé;
- il comprend un examen des pratiques qui semblent prometteuses pour atténuer les effets néfastes du bruit des éoliennes.

1.3 ÉTUDE DE SANTÉ CANADA SUR LE BRUIT DES ÉOLIENNES ET LA SANTÉ

Le commanditaire de cette évaluation, Santé Canada, a lui-même réalisé une étude distincte sur le bruit des éoliennes et la santé, laquelle a été entreprise en juillet 2012. Les résultats préliminaires de cette étude épidémiologique ont été publiés en novembre 2014. Puisque le comité d'experts avait déjà recueilli en août 2014 les données initiales utilisées pour évaluer les effets du bruit des éoliennes sur la santé (voir l'annexe B) et qu'il mettait la dernière main au présent rapport lorsque les résultats préliminaires de l'étude de Santé Canada ont été rendus publics, il n'a pu tenir compte de ces résultats dans ses délibérations. Les résultats de l'étude de Santé Canada sont toutefois présentés dans l'encadré 7.1.

Comme c'est toujours le cas pour les évaluations du CAC, le travail de recherche et de rédaction de ce rapport a été mené de façon indépendante par le comité d'experts, en réponse aux questions posées par le commanditaire. Le commanditaire n'a pas participé aux délibérations du comité d'experts et n'a pas eu accès aux ébauches du rapport.

1.4 STRUCTURE DU RAPPORT

Le chapitre 2 présente le contexte général entourant l'exploitation de l'énergie éolienne au Canada et dans le monde et les perspectives de croissance de cette industrie au Canada. Il décrit aussi le cadre général de réglementation des éoliennes au Canada. Le chapitre 3 aborde les concepts fondamentaux et les renseignements de base liés à l'acoustique et à la mesure du son, en particulier en ce qui concerne l'émission du son par les éoliennes et sa transmission. Le chapitrer 4 clarifie les principes généraux de la transduction du son dans l'oreille ainsi que les autres voies possibles de perception du son et la façon dont cette perception peut varier d'une personne à une autre. Le chapitre 5 explique le processus utilisé pour évaluer les effets néfastes du bruit sur la santé. Le chapitre 6 fournit un aperçu détaillé des données scientifiques permettant d'évaluer le lien de causalité qui pourrait exister entre le son produit par les éoliennes et les effets sur la santé précédemment décrits. Le chapitre 7 résume les constats présentés au chapitre 6 et décrit les lacunes dans les connaissances qui devraient être comblées pour mieux comprendre les effets du bruit des éoliennes sur la santé. Le chapitre 8 fait état des technologies ou pratiques prometteuses utilisées dans d'autres pays qui pourraient être envisagées au Canada pour diminuer les réactions négatives de la population au bruit des éoliennes. Le chapitre 9 résume les principales constatations faites par le comité d'experts en réponse au mandat qui lui a été confié.

2

Contexte de l'énergie éolienne

- Conception des turbines éoliennes
- Contextes canadien et international
- Surveillance de la santé
- Limites de bruit et éloignement
- Résumé du chapitre

2 Contexte de l'énergie éolienne

Principales constatations

- Dans le domaine de l'énergie éolienne, le Canada s'est classé au cinquième rang dans le monde en 2013 pour ce qui est de l'installation de nouvelle puissance et au neuvième rang à la fin de 2013 sur le plan de la puissance installée totale.
- La plus grande partie de la puissance éolienne installée au Canada se concentre en Ontario, au Québec et en Alberta.
- Le secteur de l'énergie éolienne s'est développé à une cadence différente dans chaque province canadienne. En Alberta, la puissance éolienne a augmenté de façon constante depuis 1993, sous l'influence des forces du marché et des programmes de promotion des énergies vertes mis en œuvre par les sociétés de services publics, alors qu'elle a connu une expansion rapide en Ontario depuis 2006, à la faveur des mesures incitatives instaurées par le gouvernement provincial. Au Québec, la puissance éolienne s'est accrue de façon constante depuis 1999, mais cette croissance s'est accélérée de façon radicale en 2013.
- L'exploitation de l'énergie éolienne au Canada est assujettie à la réglementation adoptée par les autorités fédérales, provinciales et municipales, et les risques associés au bruit des éoliennes sont gérés de manière différente d'un endroit à l'autre. Il n'existe pas de norme nationale en ce qui concerne l'éloignement ou les limites de bruit au Canada, bien que les limites de bruit imposées dans l'ensemble des provinces et territoires soient comparables à celles qui sont utilisées dans le reste du monde.

Il est important d'avoir une certaine idée de la progression de l'énergie éolienne au Canada avant d'aborder la question des effets néfastes que cette technologie peut avoir sur la santé. Bien que le pays possède des installations éoliennes expérimentales et commerciales depuis un bon moment déjà, leur nombre s'est rapidement accru au cours des dernières années et les éoliennes font maintenant partie du paysage canadien. Comme c'est le cas pour plusieurs nouvelles technologies, la croissance de l'industrie éolienne soulève des questions d'ordre réglementaire et social qui devront être résolues si les Canadiens sont appelés à dépendre de plus en plus de cette source d'énergie.

À l'heure actuelle, la source d'information la plus précise sur la puissance énergétique, la technologie et le développement éoliens est l'industrie éolienne elle-même. L'Association canadienne de l'énergie éolienne (CanWEA) est une association nationale sans but lucratif qui compte parmi ses membres des

propriétaires, des exploitants, des fabricants et des fournisseurs de services du secteur éolien. CanWEA maintient une base de données sur les projets éoliens au Canada, y compris sur le nombre d'éoliennes et sur leur puissance nominale. Ces données sont recueillies directement auprès des membres et sont déclarées aux organisations internationales telles que le Global Wind Energy Council (GWEC). Le comité d'experts a utilisé ces données, en combinaison avec d'autres analyses publiées, lorsque disponibles, pour décrire le secteur canadien de l'énergie éolienne.

La majorité des parcs éoliens au Canada sont situés en milieu rural, mais la plus grande partie de l'électricité qu'ils produisent sert à alimenter les grands centres urbains. Chaque éolienne occupe une superficie de terre relativement petite, soit l'espace nécessaire pour loger les fondations à la base de la turbine ainsi que le chemin d'accès. Toutefois, les éoliennes constituent des structures élevées, d'une hauteur souvent supérieure à 80 mètres au moyeu (voir le chapitre 3), et peuvent imposer une présence visuelle et sonore dans un paysage rural qui serait autrement paisible. Les éoliennes n'empêchent généralement pas les terrains environnants d'être utilisés à d'autres fins, comme l'agriculture, la randonnée, la chasse ou la circulation routière, pourvu que l'exploitation des éoliennes ne nuise pas à ces usages. La phase de construction peut cependant causer des perturbations à court terme. Certains propriétaires fonciers ruraux peuvent améliorer leur revenu en louant une petite portion de terre à un exploitant d'éoliennes. Les exploitants de parcs éoliens font valoir que puisque les éoliennes doivent faire l'objet d'un entretien et d'une surveillance réguliers, elles créent des emplois techniques dans les collectivités où elles sont installées.

2.1 CONCEPTION DES TURBINES ÉOLIENNES

Les dispositifs capables de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique sont appelés *turbines éoliennes*. Les turbines éoliennes sont classées selon diverses caractéristiques conceptuelles, y compris l'axe de rotation, la position des pales (orientation du rotor), le nombre de pales, la régulation du rotor et l'orientation par rapport au vent (voir Manwell *et al.*, 2010).

Dans ce rapport, le terme *éolienne* désigne un dispositif aux caractéristiques suivantes :

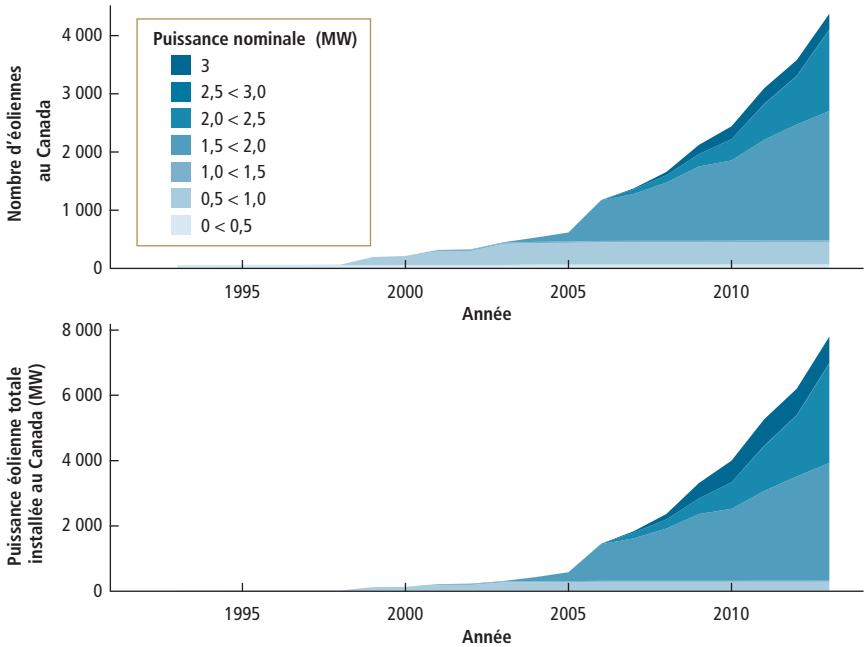
- **Moderne :** Capable de convertir l'énergie cinétique du vent en électricité par le biais d'une rotation mécanique de pales montées sur un rotor relié à un alternateur. Les éoliennes modernes sont presque toujours à trois pales.
- **À axe horizontal (EAH) :** Dont le principal axe de rotation est parallèle au sol (comme l'essieu des roues d'un camion).
- **Face au vent :** Dont les pales tournent à l'avant (face au vent) d'une tour portante.

- **À échelle commerciale :** Relié à un réseau électrique et d'une puissance d'au moins 500 kilowatts (kW). La plupart des éoliennes à échelle commerciale vendues actuellement dans le monde sont d'une puissance de 1,5 mégawatt (MW) ou plus et on prévoit que les modèles continueront d'évoluer en puissance et en taille. Certains auteurs les désignent comme des « éoliennes industrielles ».
- **Terrestre :** Situé en milieu terrestre.

Ces caractéristiques sont celles de la plupart des installations modernes utilisées par l'industrie éolienne dans le monde (Manwell *et al.*, 2010) et décrivent la vaste majorité des éoliennes installées pour produire de l'électricité à échelle commerciale au Canada. La figure 2.1 montre que toutes les éoliennes installées au Canada, ou presque, sont d'une puissance nominale d'au moins 500 kW et que les éoliennes installées depuis 2005 sont d'une puissance nominale croissante (au moins 2 MW). Il faut souligner que la plupart des éoliennes commerciales vendues aujourd'hui sont d'une puissance nominale d'au moins 1,5 MW, mais que plusieurs études importantes réalisées sur les effets du bruit des éoliennes sur la santé se rapportaient à des éoliennes plus anciennes et plus petites, lesquelles sont toutes d'une puissance nominale d'au moins 500 kW.

Ce rapport ne portera pas sur les éoliennes dont l'axe de rotation est vertical, qui sont de type sous le vent, qui sont installées en mer ou qui sont conçues pour alimenter un seul foyer (échelle résidentielle). Le Canada ne disposait pas de *parcs éoliens maritimes* au moment de rédiger ce rapport. D'autres concepts ne sont pas pris en compte parce qu'ils ne sont pas utilisés pour produire de l'électricité à échelle commerciale et certains ont des propriétés acoustiques très différentes (Wagner *et al.*, 1996; Oerlemans, 2011). Les éoliennes sous le vent, par exemple, produisent de puissants *infrasons* et *sons de basse fréquence*, ce qui explique, entre autres, pourquoi elles ne se sont pas imposées comme norme dans l'industrie (Jakobsen, 2005; van den Berg, 2011). Le présent rapport, par conséquent, porte sur les technologies actuellement utilisées et susceptibles d'être utilisées dans l'avenir au Canada.

Les principaux composants d'une éolienne moderne commerciale sont illustrés à la figure 2.2. La forme des pales crée des forces aérodynamiques de portance et de traînée lorsque le vent circule autour d'elles, tout comme l'aile d'un avion. Dans le cas d'une éolienne, cependant, ces forces sont utilisées pour générer un couple, en vertu duquel les pales font tourner le rotor autour de son axe, créant une force mécanique qui est convertie en électricité par un alternateur logé dans la nacelle.



Source des données : CanWEA, communication personnelle, 2014

Figure 2.1

Nombre d'éoliennes et puissance éolienne totale installée au Canada, par puissance nominale, 1992 à 2013

La vaste majorité des éoliennes (premier graphique) et de la puissance éolienne installée (deuxième graphique) au Canada est constituée d'éoliennes d'une puissance nominale de 500 kW ou plus. La majeure partie de l'augmentation de puissance depuis 2005 provient de l'installation d'éoliennes plus grandes, d'une puissance nominale d'au moins 2 MW

Les éoliennes sont souvent distinguées en fonction du diamètre du rotor (le diamètre de la surface balayée des pales, qui équivaut approximativement au double de la longueur des pales additionné au diamètre du moyeu) et de la hauteur du moyeu (la hauteur du moyeu sur la tour). La hauteur du moyeu représente approximativement une fois à une fois et demie le diamètre du rotor (Manwell *et al.*, 2010). Par exemple, une des éoliennes les plus fréquemment installées au Canada est le modèle GE 1.5s, fabriqué par General Electric. Ce modèle a comme caractéristiques un rotor d'un diamètre de 70,5 mètres (231 pi), un moyeu à hauteur de 65 à 100 mètres (213 à 328 pi), un poids de 157 tonnes et une puissance électrique pouvant atteindre 1,5 MW pour un vent d'une vitesse de 12 mètres par seconde (m/s) (GE, 2004). La plus grande éolienne actuellement fabriquée pour une utilisation terrestre, le modèle E-126 d'Enercon, possède un moyeu d'une hauteur de 135 mètres (443 pi), un rotor

d'un diamètre de 126 mètres (413 pi) et une puissance nominale de 7,5 MW. Ce modèle n'est pas actuellement installé au Canada. Les caractéristiques techniques de certaines éoliennes communément utilisées sont présentées au tableau 2.1. Elles ne sont présentées qu'à titre indicatif et le tableau ne doit pas être interprété comme une liste exhaustive des modèles d'éoliennes offerts sur le marché ou comme une approbation par le comité d'experts de ces modèles.

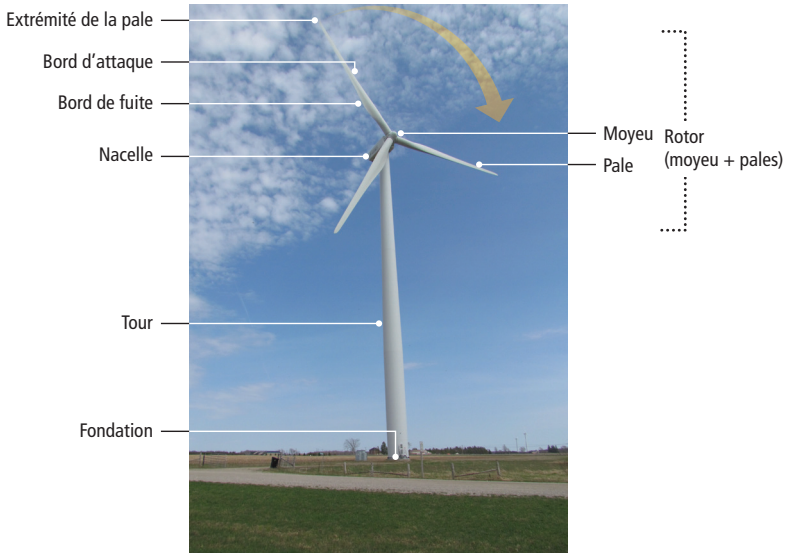


Figure 2.2

Composants d'une éolienne commerciale moderne type

Les principaux composants de l'éolienne moderne type abordée dans ce rapport sont présentés dans cette photographie d'une éolienne de 1,5 MW de General Electric du parc éolien Melancthon, près de Shelburne, en Ontario. Le rotor est constitué de trois pales rattachées à un moyeu central, qui pivote sous l'effet de la poussée exercée par le vent sur les pales. Chaque pale comporte un bord d'attaque et un bord de fuite, à l'arrière. Le moyeu relie le rotor à un alternateur et à d'autres composants mécaniques à l'intérieur de la nacelle. L'alternateur convertit l'énergie mécanique générée par le mouvement du rotor en énergie électrique. La nacelle et le rotor sont installés au sommet d'une tour qui supporte des câbles reliant l'alternateur à un réseau électrique. L'éolienne dans son ensemble est ancrée à une fondation.

/

Tableau 2.1

Exemples d'éoliennes commerciales et leurs caractéristiques

Fabricant et modèle	Diamètre du rotor (m)	Hauteur du moyeu (m)	Puissance nominale (kW)	Niveau de puissance acoustique maximal dB(A) *	Vitesse de fourniture (m/s)	Vitesse cotée du vent (m/s)	Vitesse d'éclipsage (m/s)	% de la puissance installée au Canada (fin de 2013)
Modèles encore utilisés au Canada, mais qui ne sont plus vendus								
GE 1.5s	70	65–100	1 500	ND	4,0	12	22	11,4
Vestas V80	80	60–100	1 800	105,0	4,0	15	25	7,0
Vestas V47	47	40–55	660	102,0	4,0	15	25	1,5
Modèles actuellement vendus et utilisés au Canada								
Enercon E-82 E2	82	78–138	2 000	ND	2,0	12,5	34	9,9
Vestas V90-3.0	90	65–105	3 000	109,4	3,5	15	25	7,8
Vestas V90-1.8	90	80–105	1 800	ND	4,0	12	25	7,2
GE 1.5sle	77	65–80	1 500	ND	3,5	12	25	6,8
Siemens SWT-2.3-101	101	80	2 300	ND	3–4	12–13	25	5,8
Senvion MM92	92,5	68–100	2 050	103,2	3	12	24	3,4
Enercon E-70	71	57–113	2 300	104,5	2,5	15	34	3,3
DeWind D9.2	93	80–100	2 000	ND	4,5	12	25	0,1
Reste du monde — modèles non utilisés au Canada, mais vendus dans le reste du monde								
Senvion 6.2M126	126	100–117	6 150	ND	3,5	14,5	25	0
Enercon E-126	127	135	7 580	ND	3,0	16,5	34	0
Vestas V164 **	164	site specific	8 000	ND	4,0	13,5	25	0

Sources des données : van den Berg *et al.*, 2008; Bauer, s.d.; CanWEA, communication personnelle, 2014

Les modèles cités sont des exemples courants d'éoliennes commerciales utilisées au Canada ou dans d'autres pays et ne représentent pas 100 % de la puissance installée au Canada; cette liste n'est pas exhaustive. Tous les modèles et les caractéristiques techniques sont les mêmes que pour les modèles utilisés dans les autres pays (les éoliennes sont également vendues sur un marché international).

* Le niveau de puissance acoustique d'une éolienne, mesuré en décibels (dB), varie suivant la vitesse du vent : cette colonne montre le niveau de puissance acoustique le plus élevé évalué pour

des vents d'une vitesse de 3 à 11 m/s à une hauteur de 10 m, en atmosphère neutre et pour un sol d'une rugosité normale (van den Berg *et al.,* 2008). Il faut noter qu'il s'agit de *niveaux de puissance acoustique*, ce qui correspond à la puissance sonore totale produite par l'éolienne; le *niveau de pression acoustique* (immission sonore au point récepteur) est fonction du niveau de puissance acoustique, de la distance et d'autres facteurs (voir la section 3.1.1).
** Modèle conçu exclusivement pour une utilisation en mer.

À titre comparatif, un terrain de football canadien (LCF) mesure 100,6 mètres (110 verges) d'une ligne des buts à l'autre et 59,4 mètres (65 verges) de largeur. La hauteur des plus petites éoliennes correspond approximativement à la longueur d'un terrain de football, lorsqu'on mesure l'installation de la base de la tour au sommet des pales (hauteur du moyeu plus la moitié du diamètre du rotor). La plupart des turbines, cependant, seraient trop grandes pour cadrer dans un terrain de football si elles étaient étendues sur le sol et, dans le cas de certaines des plus grandes éoliennes, la hauteur de la tour correspondrait approximativement à elle seule à la longueur d'un terrain de football. Une pale habituelle d'éolienne couvre la largeur d'un terrain de football et celles des plus grandes dépasseraient cette distance.

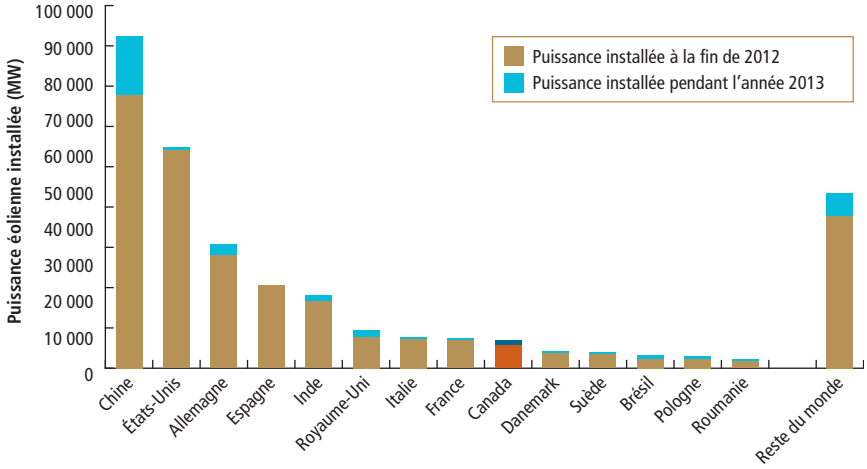
Un vent de vitesse minimale à la hauteur du moyeu est nécessaire pour qu'une éolienne puisse produire de l'électricité. Cette vitesse s'appelle la *vitesse de fourniture* ou de *démarrage*. La vitesse maximale s'appelle la *vitesse d'éclipsage*, ou de *coupure*. Entre ces deux vitesses de vent, déterminées certaines contraintes techniques et de conception, la turbine pourra fournir de l'électricité de manière sûre. Lorsque la vitesse du vent surpasse la vitesse d'éclipsage nominale, des systèmes de commande modifient l'angle de calage des pales pour que le rotor cesse de tourner et la production d'électricité est suspendue pour empêcher la turbine de s'endommager. La puissance maximale de sortie de l'alternateur constitue la *puissance nominale* (en kW ou MW), laquelle est atteinte lorsque le vent atteint sa *vitesse cotée* à la hauteur du moyeu. Par exemple, la puissance nominale de l'éolienne GE 1.5s est de 1,5 MW, ce qui correspond à la puissance produite à partir d'un vent circulant à la vitesse cotée de 12 m/s à la hauteur du moyeu (voir le tableau 2.1).

Le vent ralentit près des surfaces, en raison de la friction, ce qui engendre un gradient de vitesse du vent très prononcé entre le niveau du sol et les hauteurs plus élevées, un effet appelé cisaillement (Manwell *et al.*, 2010). Les éoliennes plus hautes peuvent tirer avantage des vents plus rapides qui soufflent à plus grande distance du sol et produire de plus grandes quantités d'électricité. Ces éoliennes de taille plus importante peuvent également être munies de plus grandes pales. Le recours à un nombre plus restreint d'éoliennes dotées de rotors de plus grand diamètre permet de produire davantage d'électricité par unité de surface au sol et est généralement plus économique qu'un plus grand

nombre d'éoliennes de plus petite taille (EWEA, 2005). Ces facteurs incitent les producteurs à installer des éoliennes de plus en plus larges et hautes, dont la taille est principalement limitée par les technologies disponibles de construction et de transport.

2.2 CONTEXTES CANADIEN ET INTERNATIONAL

La durée de vie prévue des éoliennes est de 20 à 25 ans, et la puissance actuellement installée dans plusieurs pays représente de nombreuses années d'investissement. Cinq pays produisaient 72 % de la puissance électrique éolienne mondiale à la fin de 2013 : la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne et l'Inde (GWEC, 2014) (figure 2.3). Le Canada se classait au neuvième rang dans le monde sur le plan de la puissance installée, générant approximativement 2,5 % de l'électricité d'origine éolienne produite dans le monde. Toutefois, le Canada s'est classé cinquième sur le plan de la nouvelle puissance installée en 2013, ce qui en fait un des marchés qui se développent le plus rapidement au monde. Seuls la Chine, l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Inde ont ajouté plus de puissance éolienne que le Canada en 2013.



Source des données : GWEC, 2014

Figure 2.3

Puissance éolienne totale installée dans le monde, 2013

La hauteur totale des barres représente la puissance éolienne installée cumulée à la fin de 2013 et la partie bleue au sommet de chaque barre représente la puissance éolienne installée (et sur le point d'être mise en service) en 2013. Le Canada se classe au neuvième rang dans le monde sur le plan de la puissance éolienne totale en 2013, mais au cinquième rang pour la puissance installée pendant cette année-là seulement.

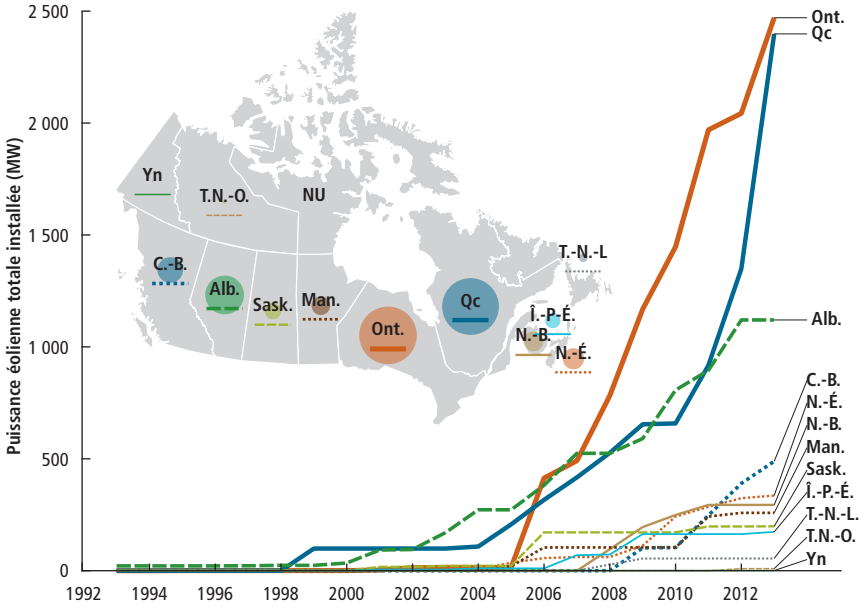
On comptait 9 219 MW de puissance éolienne installée à la fin de 2014 au Canada, ce qui répond à approximativement 4 % de la demande d'électricité au pays (CanWEA, 2014). CanWEA (2008) soutient que l'énergie éolienne pourrait satisfaire 20 % de la demande canadienne d'électricité d'ici 2025. Il faudrait pour cela installer approximativement 50 000 MW de puissance additionnelle (environ six fois la puissance actuelle), ce qui nécessiterait un territoire équivalent à peu près à la superficie de l'île du Prince-Édouard, mais réparti sur 450 endroits différents au Canada. Toutefois, l'Office national de l'énergie — l'organisme fédéral indépendant qui réglemente le développement des industries du pétrole, du gaz et de l'électricité au Canada — prévoit que la puissance éolienne totale n'atteindra que 16 000 MW en 2035 (ONE, 2013). Plusieurs provinces au Canada se sont donné des cibles en matière d'énergie éolienne ou d'énergies renouvelables, ce qui comprend l'énergie éolienne.

À la fin de 2013, 77 % de la puissance électrique installée d'origine éolienne se concentrait en Ontario, au Québec et en Alberta, mais l'énergie éolienne s'est développée à un rythme différent dans chacune de ces provinces (figure 2.4). Le premier projet éolien au Canada a vu le jour en Alberta en 1993 et consistait en une seule éolienne de 150 kW (CanWEA, communication personnelle, 2014; Ferguson-Martin et Hill, 2011). La puissance éolienne en Alberta a augmenté lentement mais constamment depuis 1998, alors qu'elle a connu une expansion rapide en Ontario après 2005. En conséquence, l'Ontario est vite devenue la première province au Canada pour ce qui est de la puissance éolienne installée (figure 2.4). Au Québec, l'énergie éolienne est apparue en 1998 et la puissance dans ce domaine s'est accrue sporadiquement, à peu près à la même cadence qu'en Alberta, jusqu'en 2013, lorsqu'elle a augmenté de 78 %.

Le développement du secteur éolien au Canada n'est déterminé qu'en partie par le fait qu'une région soit venteuse ou non — c'est-à-dire par la disponibilité des ressources éoliennes. Les projets éoliens ne sont généralement pas mis en œuvre à moins qu'ils soient économiquement viables et socialement acceptables (Toke *et al.*, 2008; Ferguson-Martin et Hill, 2011). Le développement semble dépendre d'une combinaison de facteurs institutionnels, tels que la valeur que les parties prenantes accordent au paysage (pour d'autres usages) et les politiques gouvernementales (par exemple, les programmes incitatifs, les processus de planification et d'approbation des projets) (voir Ferguson-Martin et Hill, 2011).

Les parcs éoliens doivent aussi pouvoir vendre leur électricité à un réseau électrique physiquement compatible à proximité. Un tel réseau doit être en mesure de composer avec des sources d'alimentation multiples, plus faibles et variables, comparativement à un réseau alimenté par des sources moins nombreuses et plus puissantes, telles que des centrales nucléaires, des barrages

hydroélectriques ou d'autres sources traditionnelles d'électricité. La structure du marché de l'électricité a une incidence sur la compétitivité de l'énergie éolienne par rapport aux autres sources d'énergie comme le nucléaire, l'hydraulique ou le charbon. Si un gouvernement offre des mesures incitatives fiscales ou exige des entreprises d'électricité qu'elles achètent l'électricité d'origine éolienne à un prix minimum, l'énergie éolienne peut devenir plus viable. Les cadres réglementaires fédéraux, provinciaux et municipaux couvrent plusieurs de ces facteurs et peuvent par conséquent influer sur la viabilité économique et l'acceptabilité sociale du développement de l'énergie éolienne.



Source des données : CanWEA, communication personnelle, 2014

Figure 2.4

Puissance éolienne installée par province, 1992 à 2013

La taille des cercles sur la carte insérée dans ce graphique est proportionnelle à la puissance totale installée dans chaque province ou territoire à la fin de 2013. En 2013, l'Ontario, le Québec et l'Alberta concentraient ensemble 76,8 % de la puissance éolienne totale installée au Canada. Bien que l'Alberta et le Québec aient traditionnellement été les plus importants producteurs au pays en termes de puissance éolienne installée, la puissance éolienne en Ontario s'est accrue rapidement depuis 2005 et a dépassé en 2008 celle des autres provinces. À titre de comparaison, la puissance installée en Alberta a augmenté lentement sur une plus longue période, alors qu'au Québec, l'augmentation de la puissance a été intermittente, mais s'est accélérée au cours des dernières années.

L'énergie éolienne en Alberta s'est développée malgré les limites des réseaux et le manque de programmes gouvernementaux incitatifs explicites. La production électrique d'origine éolienne semble avoir augmenté sous l'influence du marché, de la demande des consommateurs et des programmes de promotion des énergies vertes des entreprises d'électricité privées et des municipalités. De son côté, le gouvernement provincial de cette province n'a pas adopté de position officielle concernant l'énergie éolienne ou les énergies renouvelables en général (Ferguson-Martin et Hill, 2011). La situation est différente en Ontario, où le gouvernement provincial a mis en place des politiques explicites en appui à l'exploitation de l'énergie éolienne, notamment des cibles de puissance, des mesures incitatives économiques et des processus d'approbation simplifiés. Malgré ces politiques gouvernementales, les attitudes à l'égard de l'énergie éolienne en Ontario se sont nettement polarisées. Par exemple, plusieurs organisations populaires (communautaires) appuient le développement de l'énergie éolienne ou s'y opposent (Ferguson-Martin et Hill, 2011).

2.3 SURVEILLANCE DE LA SANTÉ

Comme c'est le cas pour le développement de toutes les sources d'énergie et les entreprises d'électricité, les effets du développement de l'énergie éolienne sur la santé des travailleurs et des citoyens résidant à proximité des installations sont réglementés; ils relèvent du domaine de la santé publique. La surveillance de tout effet sur la santé est compliquée du fait que la santé publique relève de diverses instances au Canada. Le gouvernement fédéral dispose de pouvoirs en matière de dépenses (notamment par le biais de transferts aux provinces et de bourses de recherche) et d'autres aspects de la santé et de la sécurité publiques, alors que les provinces sont responsables de la prestation des services de santé, des hôpitaux et des questions de nature locale. L'Agence de la santé publique du Canada (ASPC) a été créée en 2004, en partie par suite de l'éclosion du SRAS en 2002, qui a mis en relief la nécessité d'améliorer la surveillance, l'échange des données et la collaboration au sein des provinces et territoires et entre eux (Santé Canada, 2003b; ASPC, 2008). Le système de surveillance de la santé recueille des renseignements essentiels sur les tendances de la population générale, relevant souvent les signes précurseurs de situations d'urgence en santé publique ainsi que les effets de divers facteurs sur la santé publique.

La surveillance de la santé peut être passive ou active. Au Canada, la surveillance passive prend souvent la forme d'une compilation à l'échelle locale des données et rapports de santé et des statistiques d'état civil (naissances et décès) par les services locaux et régionaux de santé. Ces renseignements sont transmis à un organisme provincial, puis diffusés à l'échelle nationale par le biais d'organismes tels que l'ASPC. La surveillance passive permet de relever les tendances générales

d'une population, mais se prête souvent mal au suivi des états de santé rares ou à l'établissement d'un lien de causalité avec un nouveau facteur dans l'environnement. La surveillance active, qui s'appuie sur des méthodes de collecte d'information, telles que les sondages, exige davantage de ressources, mais permet de cibler plus précisément les conditions ou les facteurs particuliers qui peuvent influer sur la santé des gens. Le système canadien de surveillance passive ne recueille pas d'informations sur l'exposition aux éoliennes, qu'il s'agisse des niveaux de bruit, de l'éloignement ou de la présence visuelle. Par ailleurs, le comité d'experts n'a trouvé aucune enquête récente au Canada qui pourrait être utilisée pour comparer la prévalence des états de santé liés à la présence d'éoliennes à leur prévalence au sein de la population générale, ou à leur prévalence dans différentes régions, au Canada ou à ailleurs dans le monde (voir le chapitre 5).

2.4 LIMITES DE BRUIT ET ÉLOIGNEMENT

Au Canada, l'industrie de l'énergie éolienne fonctionne à l'intérieur d'un cadre réglementaire régi par plusieurs ordres de gouvernement. Le gouvernement fédéral n'exerce qu'une compétence restreinte sur le secteur de l'énergie, mais a soutenu le développement de l'énergie éolienne à l'échelle nationale au moyen de programmes de financement direct, comme le programme écoÉnergie pour l'électricité renouvelable (CanWEA, 2011). Santé Canada est responsable de la réglementation des dispositifs qui émettent des radiations, ce qui comprend les ondes acoustiques (le son et le bruit), en vertu de la *Loi sur les dispositifs émettant des radiations* (GC, 2004). Par conséquent, Santé Canada a développé une expertise dans la mesure du bruit et dans l'évaluation des effets du bruit sur la santé (Santé Canada, 2012). Comme l'électricité est de compétence provinciale, les politiques gouvernementales provinciales exercent une plus grande influence sur la structure du marché, l'infrastructure électrique, les incitatifs financiers et les processus de planification et d'approbation des projets d'énergie éolienne (voir CanWEA, 2011 pour une liste d'initiatives). La majorité des processus d'approbation provinciaux exigent également la réalisation d'une évaluation des impacts environnementaux. La réglementation du bruit des éoliennes est principalement du ressort des gouvernements provinciaux, bien que certains projets doivent se conformer aux règlements municipaux applicables, notamment aux règlements se rapportant au zonage, aux permis de construire et aux limites de bruit. La réglementation se rapportant aux bruits des éoliennes varie au Canada, puisqu'aucune norme ni aucun critère n'ont été établis à l'échelle nationale pour encadrer l'exposition au bruit des éoliennes. La diversité de la réglementation sur le bruit des éoliennes qui existe au Canada et dans le reste du monde est aussi révélatrice de la diversité

des approches adoptées et des niveaux d'exposition au bruit jugés socialement acceptables. Parmi les outils les plus couramment utilisés pour réglementer l'emplacement des éoliennes, on compte l'*éloignement* et les *limites de bruit*.

L'*éloignement* est la distance minimale qui doit exister entre une éolienne et un bâtiment ou une résidence. Cette norme a pour but de limiter l'exposition des résidents environnants à divers dangers, tels que les chutes de glace, les défaillances mécaniques et le bruit. En Ontario, les éoliennes d'une puissance supérieure à 50 kW doivent être éloignées d'au moins 550 mètres des habitations (Règlement de l'Ontario, 2012). Des normes d'éloignement par rapport aux zones habitées sont aussi appliquées au Nouveau-Brunswick, au Manitoba et au Québec, où les distances imposées varient de 500 à 550 mètres (Haugen, 2011). Ces normes d'éloignement sont similaires à celles qui sont imposées dans plusieurs autres pays.

On peut également réglementer les niveaux de bruit en limitant les niveaux de pression acoustique, mesurés sur les lieux des constructions résidentielles avoisinantes, sans égard à la distance. Ces niveaux sont définis de manière à ce que la majorité de la population ne soit pas dérangée par des bruits qui surpasseraient en intensité la limite établie par la réglementation (EPA, 2011). Les *limites de bruit* varient d'une province à l'autre et au sein de chaque province et sont parfois établies en rapport avec le bruit ambiant, la vitesse du vent, le type de zone (rurale ou résidentielle) ou le moment de la journée (Haugen, 2011). Le Manitoba a adopté une échelle des limites de bruit qui varie de 40 décibels (A) (dB(A)), lorsque la vitesse du vent est de 4 m/s, à 53 dB(A), pour un vent de 11 m/s. Les limites de bruit en Ontario varient de 40 à 51 dB(A) pour des vitesses de vent variant de 4 à 10 m/s. Au Nouveau-Brunswick, les limites de bruit varient de 40 dB(A), pour les vents en deçà de 7 m/s, à 53 dB(A), pour les vents de plus de 10 m/s. L'Alberta Utilities Commission, l'organisme qui réglemente l'industrie des services publics en Alberta, limite le bruit à des niveaux de 40 à 56 dB(A) la nuit et permet le jour des niveaux de bruit de 10 dB(A) supérieurs aux niveaux de nuit (Haugen, 2011). Les limites de bruit absolues imposées par les provinces sont comparables aux limites fixées par le Danemark, les Pays-Bas, la Suède, l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

2.5 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

L'énergie éolienne est exploitée depuis 1993 au Canada, mais la capacité de production d'électricité de ce secteur a augmenté de façon remarquable depuis 2006. L'exploitation de l'énergie éolienne s'est développée diversement dans chaque province, non seulement à cause de la variabilité des ressources éoliennes disponibles, mais aussi pour des raisons liées à la viabilité économique, à l'infrastructure électrique, à l'acceptabilité sociale, ainsi qu'aux politiques et à

la réglementation fédérales, provinciales et municipales. L'Ontario et le Québec ont augmenté leur capacité de production de façon spectaculaire au cours des dernières années, alors que cette capacité a augmenté de façon constante au cours d'une période plus longue en Alberta. Au Canada, la puissance électrique d'origine éolienne devrait continuer d'augmenter. L'industrie estime que cette source d'énergie pourrait bien répondre à 20 % de la demande d'électricité d'ici 2025, bien que les estimations de l'Office national de l'énergie soient moins optimistes. En 2013, le Canada s'est classé au cinquième rang dans le monde pour ce qui est de la nouvelle puissance éolienne installée et au neuvième rang pour la puissance installée totale. Toutefois, cette croissance rapide a créé de nouvelles situations sociales. Les éoliennes s'imposent aux paysages et à l'environnement sonore de certains secteurs ruraux et divisent et polarisent certaines collectivités. L'incertitude relative à leurs avantages et à leurs incidences, ainsi qu'à la façon de mesurer ces facteurs, a non seulement alimenté un certain malaise au sein de la population, mais a aussi conduit à une réglementation incohérente du bruit. La présence sonore des éoliennes est encadrée par une réglementation qui impose un éloignement minimal et des limites de bruit, lesquels varient selon l'endroit où l'on se trouve au Canada. Cette nouvelle source d'énergie dans l'économie canadienne pose par conséquent de nouveaux défis pour l'industrie de l'électricité, les organismes de réglementation et les collectivités.

3

Propriétés acoustiques des éoliennes

- Principes de base de l'acoustique
- Différentes sources sonores liées aux éoliennes
- Niveaux et spectres sonores des éoliennes
- Résumé du chapitre

3 Propriétés acoustiques des éoliennes

Principales constatations

- Les éoliennes génèrent du son suivant plusieurs mécanismes aux propriétés diverses. Les signaux sonores produits sont ensuite modifiés lorsqu'ils se propagent dans l'environnement.
- Mesurer le son produit par toute source est une affaire complexe, qui comprend plusieurs dimensions (par exemple, le niveau de pression acoustique, la fréquence, la pondération fréquentielle, la pondération temporelle) et s'effectue au moyen de procédés et d'équipements spéciaux.
- Les éoliennes constituent une source sonore particulièrement complexe et unique, pouvant générer une large gamme de fréquences, y compris des sons de basse fréquence. Ces sons peuvent se propager sur de plus longues distances et sont moins entravés par les matériaux des constructions que les sons de haute fréquence. Le son des éoliennes se caractérise également par une modulation d'amplitude, souvent décrite comme un sifflement ou un battement sourd.
- Les composantes de basse fréquence ne sont pas toujours adéquatement captées par les mesures pondérées en fréquence standard (p. ex., dB(A)), et la modulation d'amplitude n'est pas toujours saisie par une mesure temporelle moyenne (p. ex., le L_{eq}). Il est également difficile de mesurer la part des autres bruits ambiants, tels que celui du vent lui-même.
- Dans la plupart des cas, les mesures sonores simples constituent un premier pas important dans l'établissement de l'exposition aux sons audibles, mais des mesures plus détaillées pourraient être nécessaires pour permettre aux chercheurs de cerner avec exactitude les effets que peut avoir sur la santé chacune des sources de bruit associées aux éoliennes.

Dans toute analyse des preuves liant le bruit des éoliennes à des effets sur la santé humaine, il est utile de décrire les caractéristiques du son produit par cette technologie. Ces caractéristiques sous-tendent les possibles effets du son des éoliennes sur le corps humain. Cette question sera examinée dans des chapitres subséquents.

Ce rapport ne présente qu'un rapide survol des propriétés acoustiques des éoliennes et les lecteurs qui souhaitent obtenir des détails supplémentaires ou approfondir certains aspects techniques des questions présentées dans le présent chapitre peuvent consulter les sources citées. Les informations fournies sont valables au moment d'écrire ces lignes, mais la technologie se développe rapidement dans le

domaine de l'énergie éolienne et certains détails ou aspects conceptuels pourraient évoluer au cours des années qui viennent. Bien qu'il soit probable que les aspects fondamentaux demeurent inchangés sur le plan de l'acoustique et de la mesure du son, les chercheurs continuent d'étudier les mécanismes par lesquels les éoliennes produisent du son pour tenter de répondre à plusieurs questions, y compris à certaines des questions soulevées dans ce rapport.

3.1 PRINCIPES DE BASE DE L'ACOUSTIQUE

Un *son* est une onde de pression qui se propage dans un médium; dans le cas du son des éoliennes, le médium est l'air (ANSI/ASA S1.1, 2013). En tant qu'onde de pression, le son est constitué d'une alternance de minuscules augmentations et diminutions de la pression atmosphérique, qui voyagent (se propagent) dans l'air. On peut décrire le son en précisant ses caractéristiques, telles que la fréquence des oscillations de pression qui constituent l'onde et l'amplitude des oscillations (pression acoustique), qui peuvent toutes deux fluctuer dans le temps. Le terme *bruit* est souvent employé pour désigner un son jugé indésirable pour diverses raisons, selon le contexte dans lequel il est perçu (voir le chapitre 4).

Il n'est pas simple de mesure l'exposition au son des éoliennes parce qu'il est difficile (1) de détecter et d'enregistrer les sons de basse fréquence, (2) de résumer les informations relatives à la fluctuation des niveaux de pression acoustique au cours d'une période de temps et en fonction d'une gamme de fréquences et (3) d'isoler les signaux acoustiques produits par les éoliennes dans un environnement qui comprend plusieurs autres sources de son. Les mesures doivent résoudre toutes ces difficultés pour fournir des renseignements pertinents sur les effets possibles du son sur la santé, bien que, pour certains effets sur la santé, les caractéristiques importantes demeurent incertaines (voir les chapitres 6 et 7).

3.1.1 Niveau de pression acoustique, puissance acoustique et échelle des décibels

La *puissance acoustique* désigne la quantité totale de son produite par une source donnée, mesurée en watts (W, l'unité de mesure standard de la puissance). La *pression acoustique*, en revanche, désigne l'amplitude des fluctuations de pression d'une onde sonore qui se propage dans l'air à un endroit particulier, appelé le *récepteur*, et se mesure en pascals (Pa). La puissance acoustique représente la puissance sonore qui se dégage de la source dans toutes les directions, alors que la pression acoustique ne décrit que la part de l'onde qui atteint le récepteur. Par conséquent, la pression acoustique constitue une mesure pertinente de l'exposition au son. La pression acoustique dépend en partie de la puissance acoustique, mais d'autres facteurs environnementaux jouent également un rôle, comme nous le verrons à la prochaine section.

Bien que ces deux concepts soient apparentés, il est important de se rappeler ce qui différencie la puissance acoustique de la pression acoustique, d'autant que toutes deux sont généralement converties en niveaux mesurés en décibels (dB). L'échelle des décibels est utilisée pour de nombreuses mesures exprimées sous forme de niveau; elle interprète la différence entre une valeur donnée et une valeur de référence selon une échelle logarithmique. La valeur de référence est toujours exprimée dans la même unité que la mesure et, par conséquent, chaque type de mesure possède sa propre valeur de référence. Dans le cas des niveaux de pression acoustique dans l'air, la valeur de référence de 20 µPa (2×10^{-5} Pa) équivaut à 0 dB, ce qui se rapproche du seuil d'audition normal de l'oreille humaine à la fréquence de 1 kHz. La valeur de référence utilisée pour les niveaux de puissance acoustique est 1×10^{-12} W, et correspond à 0 dB.

L'échelle des décibels est logarithmique, comprimant de grandes plages linéaires en différences numériques plus petites. Lorsque la pression acoustique double, le niveau de pression acoustique augmente de 6 dB. Lorsqu'on souhaite combiner les mesures acoustiques de deux sources sonores distinctes, la valeur résultante en dB ne correspond pas à la simple somme des deux valeurs; chacune doit être convertie en unités linéaires avant d'effectuer les calculs, puis reconvertie en dB (voir Crocker, 2007; Leventhall, 2011). En général, les sons incohérents (qui ne sont pas parfaitement en phase les uns avec les autres) se comportent ainsi :

- la combinaison de deux sons de niveaux de pression égaux (dB) accroît la pression acoustique de 3 dB;
- si la différence entre les niveaux de pression de deux sons est supérieure à 15 dB, l'addition du niveau le plus faible a un effet négligeable sur le niveau le plus élevé.

(Manwell *et al.*, 2010)

Le niveau de pression acoustique est calculé comme un niveau moyen pour une période donnée, intégrant une plage particulière de fréquences. Le résultat est un nombre unique, qui peut être pratique lorsque l'on souhaite comparer des sons aux composantes fréquentielles et variations temporelles similaires. Toutefois, les renseignements se rapportant à la fréquence et au temps peuvent se mesurer et se décrire de diverses façons, ce qui peut conduire à des conclusions différentes sur le plan de l'exposition au son. Les valeurs en décibels ne sont pas toutes comparables; certaines méthodes peuvent produire des valeurs semblables pour des sons qui possèdent en réalité des caractéristiques très différentes. Le défi qui se pose pour toute technique de mesure consiste à cerner les caractéristiques pertinentes ainsi qu'à saisir et à mettre en relief les informations les plus importantes.

On évalue le niveau de puissance acoustique d'une éolienne en prenant des mesures dans des conditions déterminées, y compris la distance et la vitesse du vent, spécifiées par la norme 61400-11 de la Commission électrotechnique internationale (IEC) (Hessler, 2011). Le niveau de puissance acoustique des éoliennes commerciales varie généralement de 95 à 100 dB(A)[2], selon la taille et le modèle de l'éolienne (van den Berg *et al.*, 2008; Leventhall, 2011; Møller et Pedersen, 2011). Les éoliennes munies d'un rotor au diamètre plus important ou qui sont d'une puissance nominale supérieure produisent généralement un niveau de puissance acoustique plus élevé, mais cette puissance varie d'une conception à l'autre et d'un modèle à l'autre. En outre, les niveaux de puissance acoustique globaux des générations plus récentes ont diminué par rapport aux plus anciennes de même taille (Hau, 2006); grâce à l'évolution de la conception et de la construction des éoliennes, les éoliennes actuelles, de plus grande taille, produisent des niveaux de puissance acoustique semblables aux éoliennes plus anciennes de plus petite taille. Certaines données indiquent que le son produit par les éoliennes de plus grande taille contient davantage de composantes de basse fréquence, mais, encore une fois, cet aspect varie selon la conception et le manufacturier (Møller et Pedersen, 2011).

Le niveau de pression acoustique capté par le récepteur dépend ultimement de la façon dont l'émission globale du son change pendant que l'onde voyage, ou se propage, à travers le milieu situé entre la source et le récepteur. Il n'existe actuellement aucune norme internationale pour mesurer le son des parcs éoliens capté par un récepteur, bien que de nombreux facteurs doivent être pris en considération (Hessler, 2011).

3.1.2 Propagation du son

Les voies de transmission entre une source et un récepteur peuvent modifier de plusieurs façons les caractéristiques du son transmis. Par conséquent, le mouvement d'un son dans un milieu est influencé par les propriétés du médium (l'air) ainsi que par les structures physiques qui se trouvent sur le chemin entre la source et le récepteur.

Dans des conditions théoriques idéales, le son émis par une source ponctuelle se propage dans toutes les directions, comme la surface d'une sphère en expansion; la pression acoustique diminue alors de 6 dB chaque fois que l'éloignement de la source double (Bullmore, 2011). Cela suppose que le son est émis également dans toutes les directions, que la densité de l'air est uniforme et que rien n'absorbe ou ne reflète les ondes sonores. Dans la réalité, la propagation du son dépend de plusieurs facteurs, dont :

2 Voir la section 3.1.3 pour une explication des niveaux de pression acoustique pondérés en gamme A (pondération fréquentielle).

- la distance entre la source et le récepteur : ce facteur détermine la mesure dans laquelle les autres facteurs influencent le son pendant sa propagation;
- les conditions météorologiques : la vitesse du vent, la direction du vent, le cisaillement du vent, les turbulences et les gradients de température;
- la densité de l'air, qui est influencée par la température et l'humidité de l'air;
- les caractéristiques du sol : la topographie, les caractéristiques de surface et autres facteurs qui peuvent absorber ou réfléchir le son.

(Hau, 2006; Crocker, 2007; Manwell *et al.*, 2010; Bullmore, 2011)

Une source sonore peut se décrire par son niveau de puissance acoustique par rapport à sa fréquence ou à sa plage de fréquences. Toutefois, le niveau de puissance acoustique et la plage de fréquences sont modifiés par la transmission, l'absorption, la réflexion ou la réfraction du son voyageant vers le récepteur. Plusieurs de ces facteurs dépendent de la distance et de la fréquence et peuvent interagir les uns avec les autres.

À mesure que le son se propage dans l'air, une part de l'énergie acoustique se dissipe dans l'atmosphère. Les fréquences élevées sont absorbées beaucoup plus rapidement que les basses fréquences sur une même distance (Bullmore, 2011). Les fréquences plus élevées sont également réfléchies ou absorbées dans une plus large mesure par les surfaces dans l'environnement, y compris le sol. Les basses fréquences, toutefois, sont diffractées dans une plus large mesure autour des obstacles (Bullmore, 2011). Par conséquent, le niveau de pression acoustique des sons de basse fréquence diminue moins en fonction de la distance que le niveau des sons de haute fréquence.

De plus, les gradients de densité de l'air ou de vitesse du vent créent de petits changements localisés dans la vitesse du son, entraînant la réfraction des ondes sonores (Jakobsen, 2005; Crocker, 2007; Bullmore, 2011). Par exemple, un cisaillement marqué du vent se produit lorsque la vitesse du vent augmente rapidement à élévation croissante; en présence d'un gradient de vitesse du vent aussi prononcé, le son est réfracté vers le haut aux endroits en amont de la source et vers le sol aux endroits en aval de la source. Cela conduit à des niveaux de pression acoustique plus faibles au sol en amont d'une source telle qu'une éolienne et à des niveaux plus élevés en aval. En même temps, la vitesse du vent près du sol est très basse et masque très peu les autres sons.

La constitution et les matériaux des bâtiments modifient aussi énormément les sons. La plupart des matériaux composant les bâtiments résidentiels, y compris les fenêtres et les murs, influent sur la transmission des sons de haute fréquence, entraînant une diminution du niveau de pression acoustique. Toutefois, ces matériaux transmettent les sons de basse fréquence à l'intérieur sans qu'il n'y ait une diminution

importante du niveau de pression (HGC Engineering, 2010; Madsen et Pedersen, 2010; Søndergaard, 2011). Les ondes sonores peuvent également induire des vibrations dans les structures si la fréquence du son correspond à la fréquence de résonnance acoustique fondamentale des matériaux. La fréquence d'un son est inversement liée à sa longueur d'onde (la distance entre les fluctuations de pression) et les longueurs d'onde peuvent dépasser les 10 m pour des fréquences inférieures à 30 Hz. Les sons interagissent très différemment avec les structures physiques telles qu'une maison lorsque leur longueur d'onde surpasse la taille de la structure. Plutôt que d'entraver la propagation du son, une structure d'une taille inférieure à la longueur d'onde d'un son se trouve effectivement entourée de pressions oscillantes, lesquelles peuvent induire des vibrations et des sons dans la structure, à la même fréquence que le son (Findeis et Peters, 2004).

Les sons intérieurs de basse fréquence résonnent selon les propriétés des matériaux de construction en présence, telles que la taille et la forme. Cette résonance crée une « onde stationnaire » et une alternance de zones de niveaux de pression acoustique amplifiés et réduits au sein d'une pièce (Hubbard, 1982; Findeis et Peters, 2004). Comme les niveaux sonores peuvent varier d'une zone à l'autre d'une pièce ou d'une habitation, particulièrement lorsque de telles résonances se produisent, il est difficile de prévoir ou même de mesurer les niveaux sonores moyens auxquels un résident peut être exposé à l'intérieur d'une habitation (Pedersen *et al.*, 2007b).

En général, les niveaux de pression acoustique diminuent à distance croissante, plus particulièrement dans le cas des hautes fréquences que des basses fréquences. Cet effet n'est pas propre au son des éoliennes, mais accentue les composantes basses fréquences de toutes les sources intérieures et sur de plus grandes distances. Cependant, la distance en elle-même n'est pas un bon indicateur du niveau de pression acoustique global (voir Tachibana *et al.*, 2014).

Les connaissances actuelles concernant les caractéristiques des sons émis par les éoliennes et les milieux à travers lesquels ces sons se propagent peuvent être combinées pour établir des modèles qui illustrent comment les sons des éoliennes atteignent les récepteurs, tels que les résidents avoisinants. Les modèles sont utilisés pour estimer les niveaux de pression acoustique des éoliennes qu'on prévoit installer avant qu'elles soient construites, afin de cerner et d'éviter des cas potentiels de niveaux de pression acoustique inacceptables près des résidences voisines (encadré 3.1).

Encadré 3.1
Modèles d'exposition au son des éoliennes

Les modèles mathématiques peuvent s'appuyer sur des informations relatives à une source sonore, telles que le niveau de puissance acoustique, pour un éventail de fréquences et de facteurs environnementaux, afin d'estimer la propagation du son et les niveaux de pression acoustique correspondants à travers un paysage. Lors de la planification d'un projet éolien, les promoteurs utilisent de tels modèles pour anticiper les niveaux sonores et cerner les problèmes sonores potentiels avant de construire les éoliennes, ainsi que pour choisir les endroits qui permettraient de réduire au minimum l'exposition des résidents au bruit des éoliennes. Cette planification doit recourir à des modèles, puisque les mesures réelles ne peuvent être prises avant qu'une éolienne soit construite et installée, ce qui représente une entreprise coûteuse.

Des outils de modélisation standard ont été mis au point pour prévoir la propagation des sons en général (par exemple, ISO 9613-2, Nord 2000, HARMONOISE 2002) et du bruit des éoliennes en particulier (par exemple, VDI 2714, Concawe, DIN 45645-1) (Wagner *et al.*, 1996; Hau, 2006; Bullmore, 2011; Burton *et al.*, 2011; Evans et Cooper, 2012). Ces modèles varient quant au degré de détail fourni, au niveau de dépendance à l'égard des données empiriques et aux approches analytiques qui tiennent compte de certains aspects de la conception des éoliennes (Wagner *et al.*, 1996; Oerlemans et Schepers, 2009; Evans et Cooper, 2012). Les modèles peuvent ne pas convenir s'ils sont basés sur des données se rapportant à d'anciennes conceptions d'éoliennes. La majorité des méthodes prédictives s'appliquent spécifiquement aux niveaux sonores extérieurs. Dans ces cas, les niveaux intérieurs sont souvent estimés en adaptant les niveaux extérieurs estimés. La plus grande difficulté qui se pose, toutefois, est la prise en compte du degré considérable de variabilité du vent et des conditions atmosphériques, qui influencent l'émission et la propagation du son et l'incertitude associée aux différents modèles.

Les modèles d'exposition au bruit sont aussi utilisés dans plusieurs études sur les effets sur la santé (Pedersen et Persson Waye, 2007; van den Berg *et al.*, 2008; Pedersen *et al.*, 2009). Recueillir des mesures en sondant des centaines de répondants est coûteux et exige une expertise spécialisée, alors que les modèles permettent d'obtenir une mesure plus pertinente de l'exposition qu'une mesure fondée uniquement sur la distance, en prenant en compte les caractéristiques de la source et la propagation dans l'environnement.

3.1.3 Mesure du son

Les méthodes standard de mesure et de représentation du son ont influencé les recherches et les connaissances relatives aux propriétés acoustiques des éoliennes et sont présentées ici en détail pour fournir des informations qui permettront de mieux saisir les chapitres suivants.

On mesure généralement le son à l'aide de sonomètres, des appareils normalisés qui emploient un microphone pour convertir les signaux acoustiques en signaux électriques, lesquels sont analysés pour fournir diverses mesures du son. Chaque microphone répond à une gamme différente de fréquences et de pressions acoustiques. Les infrasons posent un problème particulier, en raison de leur longueur d'onde. Des dispositifs spécialisés, tels que de grands microphones souterrains blindés, sont requis pour mesurer avec précision les infrasons (HGC Engineering, 2010). De plus, le seuil d'audition de l'oreille humaine relatif aux ultrasons est relativement élevé (généralement de 80 à 110 dB); voir le chapitre 4. En conséquence, les infrasons sont souvent omis dans la mesure standard des sons audibles, bien qu'ils constituent une composante de divers sons dans l'environnement, y compris des sons produits par les éoliennes, les moteurs diésel, le vent et les vagues de la mer.

Un microphone répond à tous les sons qui l'atteignent. Donc, pour établir les caractéristiques d'une source particulière, il faut prendre des mesures dans des conditions contrôlées, où la contribution les autres sources est minimale. Pour les éoliennes, il faut souvent à cet égard mesurer le son à un certain endroit pendant que les éoliennes fonctionnent et pendant qu'elles sont immobilisées, dans des conditions de vent similaires. La différence entre ces mesures permet d'estimer les niveaux sonores relatifs des éoliennes par rapport au bruit ambiant. Le vent lui-même pose certains problèmes additionnels quand vient le temps de mesurer les sons à l'extérieur. Il crée de la turbulence autour du microphone ainsi que des faux signaux (HGC Engineering, 2010).

Une fois le signal acoustique capté par le microphone, les informations se rapportant à ce signal doivent être décrites en établissant un résumé pertinent des propriétés physiques du signal. Les propriétés fondamentales d'un son sont la pression (amplitude) et la fréquence, qui varient toutes deux dans le temps pour un même endroit. Résumer les informations liées à un signal acoustique implique un compromis entre la simplicité et la complexité. Les mesures simples sont utiles pour mettre en relief certaines caractéristiques d'un son tout en en omettant d'autres. Dans les cas où les caractéristiques pertinentes ne sont pas clairement établies, y compris sur le plan de l'acoustique et de la recherche en santé, des mesures et des analyses plus détaillées sont souvent nécessaires pour déterminer les caractéristiques les plus importantes à considérer. La mesure du son constitue donc un défi complexe et multidimensionnel.

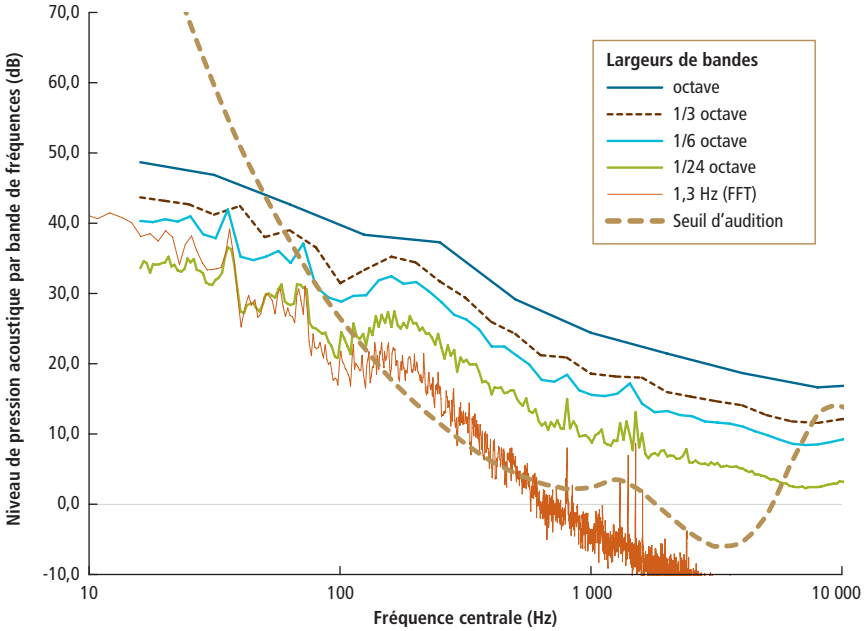
Composantes fréquentielles du son (« spectres de fréquences »)

La *fréquence* d'un son (mesurée en hertz) représente le nombre de variations de pression par seconde. La fréquence détermine la hauteur d'un son. La mesure d'un son peut être divisée en intervalles, appelés bandes de fréquences, soit chacun des segments du spectre global capté par un sonomètre. La mesure d'un ensemble de bandes de fréquences adjacentes s'appelle collectivement spectre de fréquences. En acoustique, les bandes de fréquences sont généralement identifiées en fonction de la fréquence centrale, située exactement à mi-chemin entre les limites aiguës et graves de la bande sur une échelle logarithmique (la moyenne géométrique des limites supérieures et inférieures). En musique, l'octave constituerait un exemple de bande de fréquences, où la fréquence d'une note est le double de la fréquence d'une note une octave plus grave. Les bandes de tiers d'octave suivent le même principe, excepté que le rapport entre les fréquences centrales est de deux et un tiers, au lieu du double.

Les bandes de fréquences plus étroites (par exemple, les bandes de tiers d'octave par rapport aux bandes d'octave) fournissent davantage de détails sur les composantes fréquentielles d'un son, mais chaque bande concentre une moins grande quantité d'énergie acoustique. Comme un spectre décrivant un signal se divise en bandes plus étroites, le niveau de pression acoustique de chaque bande est généralement plus faible que celui de bandes plus larges centrées sur la même fréquence de référence, comme le montre la figure 3.1. Les pointes à l'intérieur des bandes plus étroites indiquent de possibles tonalités à ces fréquences.

Les spectres de fréquences présentés à la figure 3.1 sont basés sur des données de mesure réelles recueillies pour une éolienne, mais sont représentatifs des conditions propres à cette mesure. Comme nous l'avons vu à la section 3.1.1, plusieurs facteurs influencent les spectres de fréquences et les niveaux de pression acoustique globaux captés à un endroit donné, y compris les caractéristiques de la source (éoliennes), la distance de la source, les conditions atmosphériques et les caractéristiques du terrain. Par conséquent, différentes conditions et différentes éoliennes pourraient conduire à des spectres de fréquences légèrement différents (voir la section 3.2 pour d'autres exemples).

Il n'est pas toujours simple de comparer les spectres de fréquences au seuil d'audition de l'oreille humaine, comme le montre la figure 3.1. Les seuils de perception normaux de l'oreille humaine sont établis d'après des mesures prises dans des conditions très contrôlées et ne correspondent pas nécessairement à une audibilité liée à des conditions réelles. Ces seuils sont également des valeurs médianes pour une population échantillonnée et des variations individuelles existent pour toutes les fréquences (voir la section 4.3).



Reproduit avec la permission de Madsen et Pedersen, 2010

Figure 3.1

Exemple de spectre de fréquences du son d'une éolienne

Les spectres reproduits sur cette figure sont basés sur le bruit produit par une éolienne de 1,3 MW, mesuré à 70 mètres de distance. Le niveau de pression acoustique global de ce son est de 33 dB(A). Un spectre à bandes de fréquences plus étroites montre plus de détails, les pointes indiquant de possibles tonalités à ces fréquences. Le seuil d'audition montré est celui d'une personne moyenne entendant des sons purs dans une pièce silencieuse, exempte de bruit de fond. Contrairement à l'échelle logarithmique des bandes d'octave, les bandes étroites sont d'une largeur uniforme le long de la plage de fréquences entière (1,3 Hz, dans ce cas, selon une analyse fréquentielle en bande étroite appelée transformée de Fourier rapide (FFT, pour Fast Fourier Transform)) et fournissent des informations très détaillées sur les composantes fréquentielles d'un son mesuré.

Dans ce rapport, les fréquences de 200 Hz à 2 kHz sont considérées comme des fréquences moyennes et les fréquences élevées comprennent les fréquences de 2 à 20 kHz. Les fréquences sonores de plus de 20 kHz sont ce qu'on appelle des ultrasons et sont généralement inaudibles pour les humains, du fait de la sensibilité nettement inférieure de l'oreille humaine à ces fréquences.

Du côté des fréquences plus graves, les sons d'une fréquence inférieure à 20 Hz sont généralement appelés *infrasons*. On qualifie souvent les infrasons d'inaudibles, même si, comme il a été dit plus haut, les mesures indiquent qu'ils peuvent être entendus par une personne moyenne à des niveaux de pression acoustique variant de 70 à 100 dB (Watanabe et Møller, 1990). Bien que l'oreille humaine réponde

différemment sur le plan qualitatif aux infrasons (< 20 Hz) par rapport aux ultrasons (> 20 000 Hz), les frontières entre ces plages de fréquences et d'autres sont arbitraires, puisque les changements liés aux seuils d'audition surviennent à l'intérieur d'une plage de fréquences entourant ces frontières (voir la section 4.3).

L'expression *son de basse fréquence* peut avoir plusieurs significations, selon le contexte et l'application, et ne correspond à aucune définition normalisée. La limite aiguë varie de 100 à 250 Hz, ou parfois même 500 Hz (Berglund *et al.*, 1996; Persson Waye, 2005) et la limite grave de 20 Hz (limite inférieure des infrasons) à 10 Hz, voire même 5 Hz (Leventhall, 2009). Dans le présent rapport, l'expression *son de basse fréquence* désigne les sons d'une fréquence de 20 à 200 Hz, sachant que la plage exacte peut varier d'une étude à une autre.

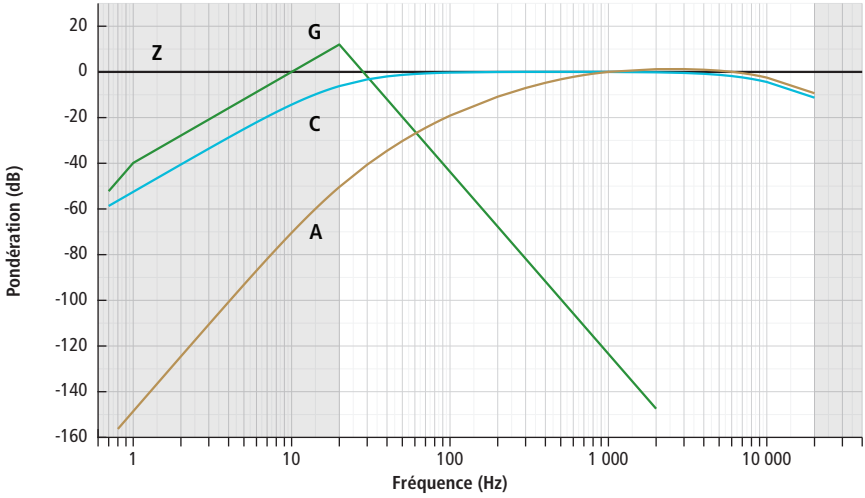
Pondération fréquentielle

Les niveaux sonores sont souvent résumés pour la plage de fréquences mesurée. Cette valeur peut être ajustée directement par l'équipement de mesure du son ou après l'enregistrement, pour accorder une plus grande importance à certaines fréquences présentant un intérêt particulier. Un niveau de pression acoustique global délaisse une part de la complexité des composantes fréquentielles pour fournir une valeur unique plus simple. Les mesures plus simples permettent une comparaison plus aisée de différents sons, mais les comparaisons basées sur la valeur pondérée en fréquence ne peuvent prendre en compte aucune différence entre les composantes fréquentielles. Le choix d'une pondération fréquentielle particulière se fait en considérant les caractéristiques de la source et les effets étudiés.

Les profils de pondération des méthodes couramment utilisées pour mesurer les sons produits par les éoliennes et d'autres sources ambiantes sont présentés à la figure 3.2. Les pondérations A et C accordent moins d'importance aux sons de basse fréquence et de fréquence très élevée (supérieure à 10 kHz). Les niveaux de pression acoustique pondérés en gamme A, ou pondérés A, s'expriment en dBA ou dB(A). La pondération G accorde une plus grande importance aux sons de basse fréquence et aux infrasons de 10 à 30 Hz. Les mesures non pondérées sont dites pondérées Z (pour « zéro »), pour spécifier l'absence d'une pondération fréquentielle. La pondération Z peut aussi s'exprimer en dB SPL (pour décibels de niveau de pression acoustique (Sound Pressure Level)) ou tout simplement dB. Toutefois, spécifier la pondération évite toute confusion. Le même son peut avoir différentes valeurs dB(Z), dB(A) ou dB(G), selon les niveaux de ses différentes composantes fréquentielles.

La pondération A avait initialement été créée pour mimer la perception humaine de la force sonore à des niveaux de pression acoustique faibles et la pondération C avait un but semblable pour les niveaux de pression plus élevés. En pratique, cette

distinction a été abandonnée et les deux pondérations sont maintenant utilisées pour tous les niveaux (Leventhall, 2011). Les mesures pondérées en gamme A sont habituellement fournies par des sonomètres et sont stipulées dans les règlements et les lignes directrices pour tous les types de bruits environnementaux (Colby *et al.*, 2009; Leventhall, 2011). En conséquence, la pratique normale actuelle consiste à faire état des niveaux de bruit ambiant à l'aide de mesures pondérées A, ce qui facilite la comparaison des mesures mentionnées dans les diverses études d'une façon qui correspond à la réponse de l'oreille humaine. Les comparaisons basées sur des mesures pondérées A peuvent ne pas être valides, cependant, pour les sons aux composantes fréquentielles très différentes, en particulier pour les composantes fréquentielles pondérées à la baisse.



Source des données : IEC 61672:2003 (pondération A et C); ISO 7196:1995 (pondération G)

Figure 3.2

Méthodes usuelles de pondération des mesures du niveau de pression acoustique

Les valeurs positives sur l'axe vertical indiquent que les niveaux acoustiques à cette fréquence sont augmentés (pondérés à la hausse) à la fréquence indiquée; les valeurs négatives indiquent que les niveaux acoustiques à ces fréquences sont diminués (pondérés à la baisse) selon la quantité indiquée sur l'axe vertical. Les zones ombragées regroupent les infrasons (fréquences inférieures à 20 Hz) et les ultrasons (fréquences supérieures à 20 kHz). La pondération Z indique des mesures linéaires, non pondérées, pour lesquelles les niveaux acoustiques ne sont pas ajustés en fonction de la fréquence. Les pondérations A et C avaient initialement pour but reproduire la sensibilité de l'oreille humaine en pondérant à la baisse les sons de basse fréquence et les infrasons. La pondération G accorde une importance accrue aux fréquences comprises entre 10 et 30 Hz. La courbe de la pondération G représentée est une approximation sur une échelle logarithmique.

Pondération temporelle

En sus de la pondération fréquentielle, toutes les mesures acoustiques sont ramenées à une moyenne calculée en fonction d'un intervalle de temps. Même lorsque le son est mesuré sur des périodes plus longues, de plusieurs heures ou jours par exemple, les mesures sont souvent enregistrées en fonction de plusieurs intervalles réguliers, en général d'une seconde (longs) ou 1/8e de seconde (courts). Une série de mesures peut ensuite être traitée pour calculer différents paramètres et analyser comment les niveaux sonores varient dans le temps. Certains indicateurs courants d'exposition au bruit ambiant sont décrits au tableau 3.1.

Tableau 3.1

Indicateurs et notations de niveaux de pression acoustique

L_{eq}, L_{Aeq}	Niveau de pression acoustique continu équivalent : Un niveau de pression acoustique stable qui produirait un niveau équivalent pendant la période mesurée. Aucune pondération n'est faite pour aucune partie de la période de temps mesurée, qui est indiquée en indice après une virgule. La pondération fréquentielle est indiquée par la lettre correspondante en indice (A, C, G, etc.). Par exemple, $LA_{eq,1h}$ est l'équivalent d'un niveau de pression acoustique pondéré en gamme A émis de manière continue pendant une heure.
L_f	Mesures brèves (Fast), intégrées sur une période d'un huitième de seconde.
L_s	Mesures longues (Slow), intégrées sur une période d'une seconde.
L_{dn}	La moyenne des niveaux de pression acoustique pondérés en gamme A sur une période d'un an ($L_{Aeq,1a}$ ou $L_{Aeq,1yr}$), où 10 dB(A) sont ajoutés aux niveaux nocturnes. Les périodes nocturnes habituellement utilisées sont de 23 heures à 7 heures ou de 22 heures à 6 heures.
L_{den}	Similaire à L_{dn}, sauf que 5 dB(A) sont également ajoutés aux niveaux de soirée, soit de 18 heures à 22 heures ou de 19 heures à 23 heures.
$L_{night,outside}$	La moyenne annuelle des niveaux de pression acoustique nocturnes ($L_{Aeq,nuit}$ ou $L_{Aeq,night}$ sur une année typique), mesurée à l'extérieur. Cette mesure est souvent utilisée en Europe comme indicateur à long terme pour les niveaux de bruits nocturnes.
L_{max}	Le niveau de pression acoustique maximal observé pendant la période de mesure.
L_{10}, L_{50}, L_{90}	Le niveau dépassé pendant un pourcentage de la période mesurée, indiqué par le nombre en indice. Par exemple, L_{10} indique le niveau acoustique dépassé 10 % du temps et donne une idée des limites supérieures atteintes pendant cette période.

(OMS, 2009; Münzel *et al.*, 2014)

L'intervalle de temps que couvre une mesure a plusieurs incidences sur la façon dont elle est interprétée et comparée à d'autres mesures. Les moyennes à long terme peuvent constituer des indicateurs utiles de l'exposition au bruit pouvant avoir un effet sur la santé (WHO, 2009), mais les intervalles plus courts peuvent fournir beaucoup plus de détails sur la façon dont le son varie avec le temps. En général, les intervalles de mesure plus courts font ressortir des variations plus importantes.

Cependant, les intervalles plus longs, comme le L_{eq}, sont souvent utilisés, et ceux-là ne rendent pas compte des effets à court terme comme la modulation d'amplitude (voir la figure 3.6).

3.2 DIFFÉRENTES SOURCES SONORES LIÉES AUX ÉOLIENNES

Les éoliennes produisent du son principalement à partir de deux types de sources :

- **Mécaniques,** comprenant les sources liées au mouvement physique de la boîte d'engrenage, de l'alternateur et des autres composants situés dans la nacelle et autour d'elle. Les sons issus de ces sources ont un caractère principalement tonal (dominé par une gamme étroite de fréquences), mais peuvent être de type *large bande*, ce qui signifie qu'ils sont composés de sons répartis sur une large gamme de fréquences.
- **Aérodynamiques,** se rapportant à la friction de l'air contre les pales. Ces sources produisent habituellement des sons à large bande à des niveaux proportionnels à la vitesse relative de l'air et des pales.

(Hau, 2006; Manwell *et al.*, 2010; Oerlemans, 2011)

L'amélioration de la conception et de la fabrication des éoliennes a permis de réduire les niveaux sonores émis par les sources mécaniques; en conséquence, le bruit aérodynamique généré par les pales constitue maintenant le bruit dominant des éoliennes commerciales modernes (Hau, 2006; Oerlemans, 2011). Les sons de basse fréquence associés aux sources mécaniques sont toutefois nettement audibles dans le cas de certaines éoliennes (Søndergaard et Madsen, 2008; Madsen et Pedersen, 2010).

Les mécanismes aérodynamiques en vertu desquels les éoliennes produisent du son sont liés à l'interaction entre l'air en mouvement et différentes parties des pales. Ces interactions dépendent de la vitesse et de la turbulence du vent de face, de la forme de la pale (coupe transversale et contour), de l'angle entre la pale et la direction du vent qui s'y écoule soufflant sur elle (l'angle d'attaque) et de la distance du moyeu (Wagner *et al.*, 1996; Oerlemans, 2011). En particulier, les parties de la pale les plus près de l'extrémité se déplacent plus rapidement que les parties les plus près du moyeu, ce qui augmente la vélocité relative de l'air. Des vélocités relatives plus élevées entraînent généralement des niveaux sonores plus élevés, surtout dans le cas des fréquences plus aiguës (Oerlemans, 2011). Par conséquent, la plus grande partie du bruit d'origine aérodynamique se produit près de (mais pas à) l'extrémité des pales (Oerlemans et Méndez López, 2005; Oerlemans, 2009). Cela explique

en partie pourquoi les éoliennes aux pales plus longues produisent des niveaux de puissance acoustique plus élevés : plus les pales sont longues, plus les vélocités relatives près de l'extrémité des pales sont élevées pour une même vitesse de rotation.

Cependant, différents mécanismes aérodynamiques produisent des sons de caractéristiques différentes. Des *sons de basse fréquence* peuvent être produits par les turbulences du vent qui entrent en contact avec le bord d'attaque de la pale (Oerlemans, 2011). Ce phénomène varie considérablement d'un site à un autre, selon les conditions locales. Par exemple, une éolienne située dans le sillage d'une autre éolienne sera particulièrement susceptible d'être soumise à des turbulences. Le son produit par l'écoulement de l'air contre l'extrémité des pales (bruit en bout de pale) est généralement à large bande et inclut des composantes de haute fréquence, mais ne contribue que dans certains cas au son global émis (Wagner *et al.*, 1996; Oerlemans, 2011). Le son produit par l'air qui s'écoule contre le bord de fuite de la pale constitue habituellement la principale source de bruit des éoliennes et est globalement à large bande (Oerlemans, 2011).

À mesure que les pales se dégradent sous l'effet de l'érosion et de l'accumulation de débris, cependant, elles peuvent produire plus de bruit qu'initialement, en raison de la turbulence créée par l'écoulement de l'air à leur surface, qui n'est pas aussi lisse que ce qui avait été prévu à la conception (Oerlemans *et al.*, 2007).

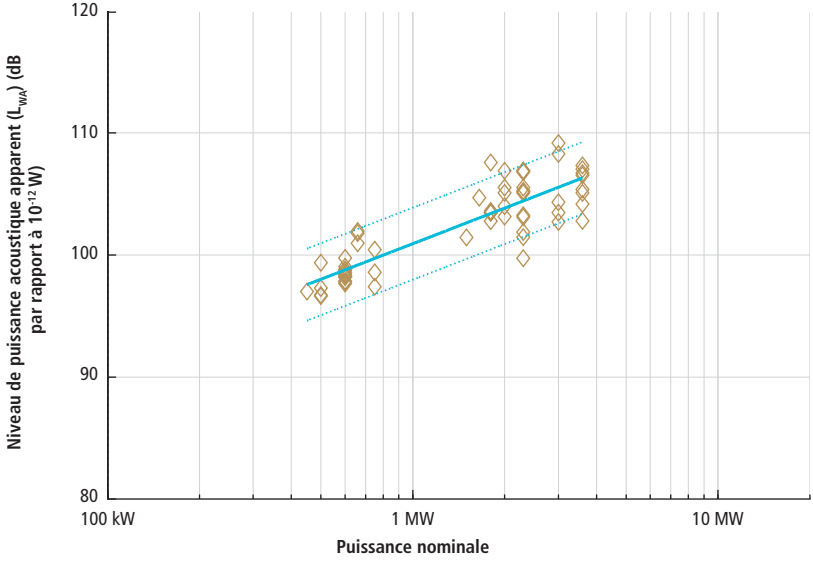
Les sources sonores aérodynamiques associées aux pales des éoliennes ont également une forte composante directionnelle, rayonnant principalement dans le sens du vent, en sens contraire, ou même perpendiculairement, selon le mécanisme dominant (Oerlemans, 2011). Par conséquent, l'amplitude du signal acoustique à un endroit donné, mesurée par le niveau de pression acoustique, varie selon la direction, la vitesse et la turbulence du vent. De plus, pendant que le rotor tourne, l'orientation de chaque pale change par rapport à un récepteur stationnaire. En conséquence, le niveau de pression acoustique atteignant un récepteur depuis une éolienne donnée varie également à mesure que les pales tournent, ce qui génère une *modulation d'amplitude de pression* périodique — des changements dans le niveau de pression acoustique avec le temps (van den Berg et Bowdler, 2011; RenewableUK, 2013).

Puisque les mécanismes aérodynamiques sont à l'origine de la plus grande partie des sons émis par les éoliennes, les niveaux de puissance acoustique augmentent proportionnellement à la vitesse du vent, jusqu'au niveau de puissance acoustique maximal associé à la vitesse cotée du vent (Wagner *et al.*, 1996; Søndergaard, 2011). Par ailleurs, la vitesse de vent pertinente qui influence les niveaux de puissance acoustique est celle qui se produit à la hauteur des pales et qui peut différer de celle qui existe au niveau du sol. À des diamètres de rotor de 50 à 100 mètres ou

plus, les fluctuations dans la vitesse du vent dans la zone balayée par les pales du rotor peuvent aussi augmenter la production sonore ainsi que la modulation d'amplitude des sons émis.

3.3 NIVEAUX ET SPECTRES SONORES DES ÉOLIENNES

La caractérisation du son des éoliennes est compliquée par la variation des mécanismes qui produisent le son, les changements qui se produisent pendant la transmission du son sur un éventail de distances et l'absence de normes de mesurage (Hessler, 2011). La figure 3.3 permet de comparer le niveau de puissance acoustique des éoliennes à leur puissance électrique nominale.



Reproduit avec la permission de Møller et Pedersen, 2011; Møller *et al.*, 2011

Figure 3.3

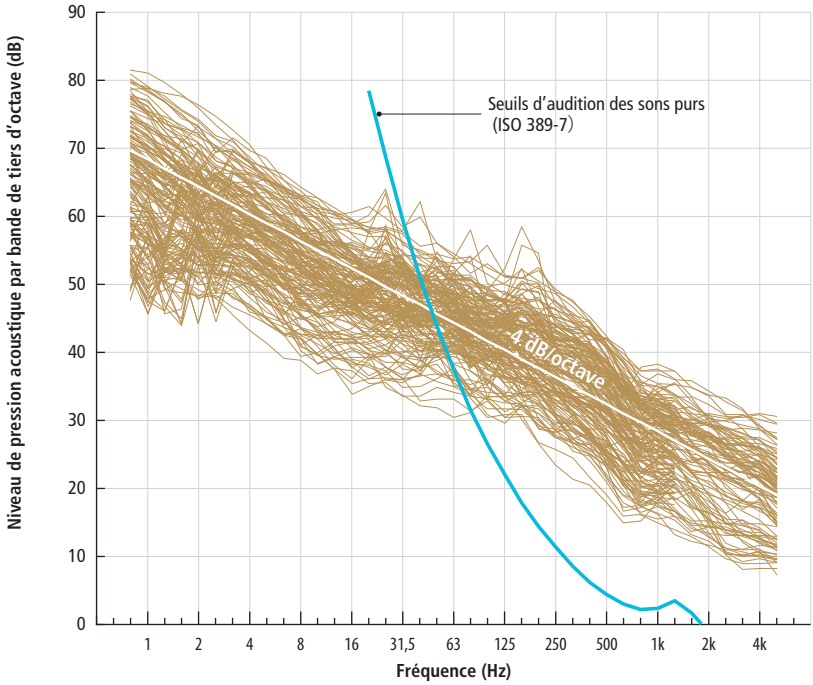
Niveau de puissance acoustique apparent (L_{WA}) des éoliennes en fonction de la puissance nominale

Ces données sont basées sur les mesures prises en Europe, à partir de 61 éoliennes de divers modèles, sous un vent de 8 m/s, selon les normes IEC 61400-11. Chaque éolienne est représentée par un losange. Une ligne de régression est montrée, avec des intervalles de confiance à 90 % représentés par des tirets. Les éoliennes d'une plus grande puissance nominale tendent à avoir un niveau de puissance acoustique plus élevé, mais ce niveau varie aussi entre les différents modèles d'une même puissance nominale. La pente est de près de 10 dB par décade (9,7), ce qui correspond à une puissance acoustique égale pour une même puissance électrique.

Bien qu'il existe une méthode normalisée pour mesurer le niveau de puissance acoustique des éoliennes (IEC 61400-11), les méthodes utilisées pour mesurer le niveau de pression acoustique (exposition) près du récepteur doivent être adaptées en fonction des circonstances et des facteurs techniques particuliers à chaque cas. Il est difficile de répondre à des questions comme « dans quelle mesure les éoliennes sont-elles bruyantes? » parce que la réponse dépend des conditions de vent et des conditions atmosphériques locales, de la distance de la turbine et de la topographie qui sépare l'éolienne du récepteur. Des quantités considérables de mesures prises dans les dernières années, cependant, commencent à jeter de la lumière sur l'ordre de variation et les caractéristiques des sons émis par les éoliennes.

Tachibana *et al.* (2014) font état de mesures extérieures prises depuis plusieurs points autour de 29 parcs éoliens, à des distances de 100 à 1 000 mètres de l'éolienne la plus proche. Les spectres combinés sont présentés à la figure 3.4, qui montre un certain degré de variation de niveau à toutes les fréquences, mais une forme globalement constante, où les niveaux diminuent de 4 dB approximativement par octave. Les pointes dans les plages de sons de basse fréquence et d'infrasons (< 250 Hz) laissent supposer la présence de composantes de basse fréquence dans certains cas. Le niveau moyen pour une période nocturne de 10 minutes varie de 25 à 50 dB(A) pour l'ensemble des mesures prises à l'extérieur, la plupart se situant entre 36 et 45 dB(A) (Tachibana *et al.*, 2014).

Parmi les autres sources de sons de niveaux pondérés A semblables, on retrouve le salon moyen, un bureau paisible, une circulation automobile légère à plus de 20 m de distance, un appareil de climatisation à plus de 60 m de distance ou le vent lui-même (Wagner *et al.*, 1996; Colby *et al.*, 2009; Fortin *et al.*, 2013), bien que les sons produits par ces sources puissent varier dans le temps différemment des sons produits par les éoliennes, ou comprendre des composantes fréquentielles différentes. Dans certains cas, le niveau du bruit de fond émis par le vent et les vagues peut être similaire ou supérieur au bruit des éoliennes, rendant difficile l'isolement du son des éoliennes (Hepburn, 2006; Tachibana *et al.*, 2014). Deux sons de même niveau de pression global pondéré A peuvent ne pas avoir les mêmes effets sur la santé, toutefois, étant donné que d'autres caractéristiques peuvent prendre plus d'importance, telles que les niveaux maximaux, l'exposition à long terme ou l'interprétation du son par la personne qui l'entend.



Adapté avec la permission de Tachibana *et al.*, 2014 et INCE/USA

Figure 3.4

Niveaux pression acoustique non pondérés mesurés par bande de tiers d'octave autour de 29 parcs éoliens au Japon

Des spectres par bande de tiers d'octave sont superposés pour 164 emplacements extérieurs situés autour de 29 parcs éoliens au Japon, à des distances de 100 à 1 000 mètres approximativement de l'éolienne la plus proche. Chaque spectre est basé sur une période de mesure nocturne de 10 minutes et les niveaux de pression acoustique ne sont pas pondérés (dB(Z)). Les données relatives à quatre sites côtiers ont été exclues parce que le bruit des éoliennes ne pouvait être détecté au-dessus du bruit de fond produit par les vagues et le vent. Les pointes dans chaque spectre indiquent dans certains cas la présence de tonalités de basse fréquence. Ces spectres non pondérés correspondaient à des niveaux nocturnes s'étalant de 25 à 50 dB(A), la plupart se situant entre 35 et 45 dB(A). Le niveau des infrasons semblait inférieur au seuil médian de l'audition humaine (d'après des expériences en laboratoire); les niveaux de pression des infrasons variaient de 46 à 75 dB(G), le sommet de la distribution variant de 61 à 65 dB(G). Les seuils d'audition (ISO 389-7:2005) sont montrés à des fins de comparaison, mais ce seuil est basé sur des mesures prises à partir de sons purs et varie selon chaque individu; les composantes fréquentielles au-dessus de cette ligne ne sont pas nécessairement audibles et les fréquences juste au-dessous de cette ligne ne sont pas nécessairement inaudibles.

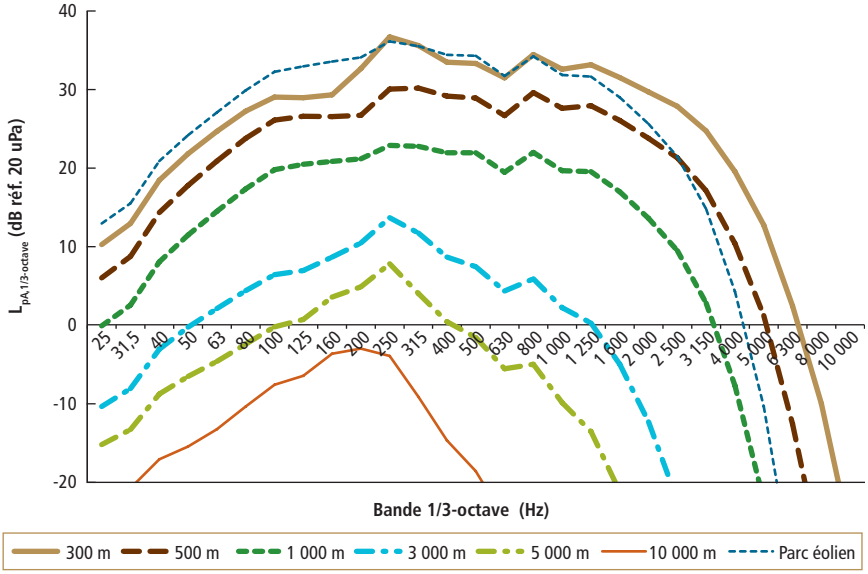
Bien que les niveaux de pression des sons produits par les éoliennes tendent à diminuer à mesure que la fréquence augmente, les fréquences moyennes et élevées sont souvent les plus audibles, parce que l'oreille humaine est plus sensible à ces fréquences. Comme nous l'avons mentionné plus haut, il est difficile d'évaluer l'audibilité d'après des spectres comme ceux que présente la figure 3.5, en raison des différences qui existent entre la manière dont sont mesurés les sons et les seuils d'audition (voir le chapitre 4 pour des détails additionnels). Les niveaux des infrasons (< 20 Hz) dans les données japonaises étaient inférieurs aux seuils d'audition de l'oreille humaine, d'après les études menées en laboratoire à partir de sons enregistrés (Tachibana *et al.*, 2014). Au-dessus de 20 Hz, les mêmes études en laboratoire ont révélé que les sons enregistrés de ces éoliennes étaient en fait audibles. Ces observations sont conformes à plusieurs autres études qui ont conclu que les niveaux moyens des infrasons produits par des éoliennes modernes et mesurés à l'extérieur sont inférieurs au seuil d'audition humaine, même à une distance de 100 m d'une éolienne (Jakobsen, 2005; HGC Engineering, 2010; Madsen et Pedersen, 2010). Hepburn (2006) a constaté que les niveaux des infrasons n'étaient pas considérablement supérieurs aux niveaux du bruit ambiant à 1 000 mètres des éoliennes du parc éolien de Castle River, en Alberta; les niveaux des infrasons variaient de 53 à 62 dB(Z) dans des conditions peu venteuses et de 76 à 82 dB(Z) dans des conditions très venteuses, ce qui est conforme aux mesures de Tachibana *et al.* (2014).

Les spectres généraux présentés à la figure 3.5 représentent des mesures prises à plusieurs distances différentes. On observe généralement que le spectre d'une éolienne unique se décale vers une dominance des fréquences plus basses à mesure que la distance augmente, alors que le niveau de pression acoustique diminue, comme nous l'avons vu à la section 3.1.2. La figure 3.5 montre les spectres pondérés A prévus à distance croissante d'une éolienne, d'après un niveau de pression acoustique global de 45 dB(A) mesuré à 300 mètres. À des distances supérieures, les fréquences susceptibles de dominer la plage audible (c.-à-d., les mesures pondérées A) se décalent vers les fréquences plus basses, alors que le niveau global de pression acoustique diminue.

Comme le décrit la section 3.2, les pales en rotation d'une éolienne peuvent émettre des sons à des niveaux qui fluctuent périodiquement par rapport à un observateur stationnaire — un phénomène appelé *modulation d'amplitude* périodique. La modulation d'amplitude se décrit sur le plan de la profondeur, soit la différence entre les niveaux de pression acoustique le plus faible et le plus élevé, et de la *fréquence*, soit la vitesse d'alternance entre les niveaux de pression acoustique le plus bas et le niveau plus élevé. La fréquence de modulation ne doit pas être confondue avec la plage de fréquences d'un son dont les niveaux de pression varient. Bien que les deux se mesurent en Hz, la modulation d'amplitude fluctue généralement à une

vitesse similaire à la fréquence de passage d'une pale, soit à approximativement 1 Hz (ce qui signifie qu'une seconde s'écoule entre le passage de chaque pale en un point donné), tandis que la modulation d'amplitude peut influencer un éventail de fréquences sonores produites par les éoliennes. Bien que d'autres sources de bruit ambiant, comme la circulation routière, produisent aussi une modulation d'amplitude (niveau de pression acoustique qui varie avec le temps), le son des éoliennes est particulier, en ce que la modulation d'amplitude se répète régulièrement au fil du passage des pales — elle est périodique et souvent décrite comme un « sifflement » ou un « battement sourd », selon les fréquences générées.

Peu de mesures de modulation d'amplitude ont été publiées pour les éoliennes, et la profondeur (le taux) de modulation est parfois déterminée suivant différents paramètres de mesure (RenewableUK, 2013; Tachibana *et al.*, 2014) (voir la figure 3.6).

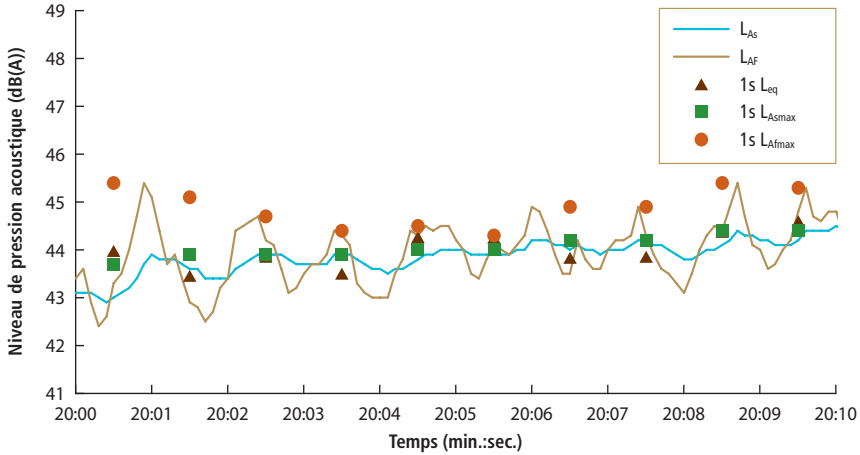


Source des données : Søndergaard, 2011. Reproduit avec la permission de Multi-Science Publishing Company

Figure 3.5

Spectres acoustiques modélisés pour diverses distances d'une éolienne

Des estimations de spectres acoustiques ont été générées à l'aide du modèle d'éolienne Nord2000, en supposant un terrain agricole plat et une vitesse de vent de 8 m/s. Les estimations étaient basées sur un spectre acoustique mesuré de 45 dB(A) à 300 m d'une éolienne « type » d'une hauteur au moyeu de 90 m (ligne continue en gras sur la figure). La ligne pointillée appelée « Parc éolien » représente le spectre d'un parc éolien comptant plusieurs éoliennes générant également un niveau de pression acoustique global de 45 dB(A). Ces estimations modélisées montrent comment les fréquences pondérées A dominantes se décalent vers les fréquences graves à distance croissante d'une éolienne.



Source des données : Kaliski, 2014. Reproduit et adapté avec la permission de RSG, Inc., (fondé par MassCEC et co-géré avec MassCEC par MassDEP)

Figure 3.6

Diverses mesures pondérées A du niveau de pression acoustique généré par une éolienne sur une période de 10 secondes

Ce graphique présente divers types de mesures pour le même son capté à 260 mètres d'une seule éolienne (taille et modèle non précisés) dans la direction perpendiculaire au vent. Toutes les mesures sont pondérées A. L_{AS} indique des mesures longues, intégrées sur des intervalles d'une seconde, alors que L_{AF} indique des mesures courtes, intégrées sur des intervalles d'un huitième de seconde : ces intervalles se recoupent et on retrouve donc plus d'une mesure L_{AS} instantanée par seconde d'observation (chaque mesure L_{AS} intègre la seconde précédente). La principale différence est que les mesures courtes font état de changements plus rapides du niveau de pression acoustique. Le L_{eq} et les niveaux maximaux pour L_{AS} et L_{AF} sont aussi indiqués pour chaque intervalle d'une seconde de la période mesurée. Ces valeurs montrent que les mesures plus courtes (L_{AF}) sont plus aptes à faire état des variations plus importantes et qu'elles ont donc un effet sur d'autres types de mesures, telles que L_{Amax}, pour le même son. En suivant l'axe du temps, on peut aussi constater l'effet régulier de modulation d'amplitude du bruit de l'éolienne, qui semble plus marqué lorsque des mesures courtes (L_{AF}) sont utilisées, mais qui ne serait pas apparent avec une moyenne à court terme ou à long terme (L_{eq}).

Les données disponibles indiquent que la profondeur de modulation varie d'un niveau non existant à approximativement 5 dB, la plupart se situant entre 2 et 3 dB (Oerlemans et Schepers, 2009; van den Berg et Bowdler, 2011; Tachibana *et al.*, 2014). Une profondeur de modulation de 2dB ou plus est considérée comme audible (van den Berg et Bowdler, 2011), donc la modulation d'amplitude dans les sons produits par les éoliennes est probablement perceptible dans plusieurs cas, mais pas tous. La majorité des cas de modulation d'amplitude concernent des sons se situant dans une plage de fréquences moyennes de 200 à 1 000 Hz. Ces sons modulés sont souvent décrits comme un « sifflement » (Bowdler, 2008; van den Berg et Bowdler, 2011; RenewableUK, 2013).

RenewableUK — une association commerciale à but non lucratif qui regroupe des entreprises exploitant des énergies renouvelables au Royaume-Uni — a publié un ensemble de rapports de recherche qui établissent une distinction entre la modulation normale et la modulation augmentée ou d'autres types de modulation d'amplitude. La modulation d'amplitude augmentée présenterait une plus grande profondeur, des fréquences plus graves ou d'autres caractéristiques en dehors de la gamme normale (RenewableUK, 2013). La modulation d'amplitude normale s'explique par le passage de l'air sur le bord de fuite pendant le mouvement de la pale, comme nous l'avons mentionné plus haut, et est généralement plus profonde dans le sens perpendiculaire à la direction du vent, dans le même plan que le rotor de l'éolienne (Oerlemans et Schepers, 2009; van den Berg et Bowdler, 2011; RenewableUK, 2013). D'autres modulations d'amplitude seraient attribuables aux rafales de vent, à la turbulence locale ou à d'autres conditions de vent non uniformes qui interagissent avec les pales tournant de manière périodique (RenewableUK, 2013). La modulation d'amplitude augmentée tend à se produire pendant de brèves périodes, mais la profondeur de la modulation peut approcher 10 dB, souvent à de basses fréquences (1 à 2 kHz), et le son peut se propager sur de plus longues distances dans le sens du vent que dans le cas d'une modulation d'amplitude normale (Bowdler, 2008; van den Berg et Bowdler, 2011; RenewableUK, 2013). La modulation d'amplitude augmentée est parfois décrite comme un « battement sourd » et se distingue du « sifflement » dont nous avons parlé par une profondeur plus importante et des composantes fréquentielles plus graves. Les types de modulation d'amplitude et les causes font actuellement l'objet de recherches, notamment pour déterminer comment le caractère d'une modulation se propage à l'extérieur (van den Berg et Bowdler, 2011; RenewableUK, 2013).

3.4 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Les éoliennes produisent du son par différents mécanismes aux caractéristiques diverses. Ces signaux sonores sont ensuite modifiés pendant leur propagation dans l'environnement. Le son d'une éolienne est par conséquent très complexe et variable, mais possède certaines caractéristiques qui sont similaires à celles d'autres sources de bruit dans les collectivités, comme la circulation routière et aérienne, par exemple :

- Il est à large bande, composé de sons émis sur une large plage de fréquences, dont les niveaux diminuent généralement de 4 dB par octave (HGC Engineering, 2010; Tachibana *et al.*, 2014).
- Les niveaux globaux de pression acoustiques à l'extérieur varient considérablement en fonction de la distance, de la vitesse du vent et de la transmission de la source au récepteur (Tachibana *et al.*, 2014).

- Les fréquences les plus élevées ont tendance à être réduites à l'intérieur et avec l'éloignement, conduisant à une plus grande prévalence des basses fréquences (HGC Engineering, 2010; Søndergaard, 2011). Les sons de basse fréquence peuvent causer des phénomènes de résonnance acoustique dans les structures.
- Le son des éoliennes est modulé en amplitude, les niveaux sonores changeant au fil du temps.

Les éoliennes émettent également un son ayant les caractéristiques suivantes, qui sont moins communes que pour les autres sources de bruit dans la collectivité :

- Les sons provenant des éoliennes peuvent descendre jusque dans la gamme infrasonore et, dans certains cas, présenter des pointes ou des composantes tonales de basse fréquence (Søndergaard et Madsen, 2008; HGC Engineering, 2010; Madsen et Pedersen, 2010; Tachibana *et al.*, 2014).
- Le niveau de puissance acoustique augmente avec la vitesse du vent à la hauteur des pales, jusqu'à la vitesse cotée du vent de la turbine, ce qui correspond souvent à une hauteur de 60 à 100 mètres ou plus au-dessus du sol (Wagner *et al.*, 1996; Søndergaard, 2011).
- Les sons émis par les éoliennes peuvent présenter une modulation d'amplitude périodique, soit une fluctuation régulière du volume qui correspond à la fréquence de passage des pales en un point (approximativement 1 Hz), ce qui lui confère un caractère de « sifflement » ou de « battement sourd », selon les fréquences sonores dominantes qui subissent la modulation. La profondeur de modulation est inférieure à 5 dB dans la plupart des cas, mais dans de rares cas, elle peut approcher une puissance de 10 dB (van den Berg et Bowdler, 2011; RenewableUK, 2013; Tachibana *et al.*, 2014).

Le mesurage du son est limité par les équipements et les méthodes disponibles, mais comprend généralement des mesures du niveau de pression acoustique et de la fréquence. Ces mesures sont souvent pondérées en fréquence pour refléter les réponses de l'oreille humaine (pondération A) et sont résumées sous la forme d'une moyenne établie par rapport à une période (niveau de pression acoustique équivalent, L_{eq}).

Le comité d'experts reconnaît qu'un niveau de pression acoustique moyen pondéré A (L_{Aeq}) n'a pas pour but de représenter le son dans toute sa complexité, mais fournit souvent une première approximation utile de l'exposition à long terme à ce son. Les comparaisons basées sur de tels niveaux moyens globaux, cependant, peuvent ne pas tenir compte de différences importantes liées aux composantes fréquentielles ou à la modulation d'amplitude du son. Lorsque les conditions sonores sont inhabituelles ou qu'elles soulèvent une préoccupation particulière, des mesures plus détaillées peuvent s'imposer pour bien cerner certains problèmes. Le paramètre de mesure du son le plus approprié doit tenir compte à la fois de la source et des caractéristiques sonores considérées.

4

Audition et perception du son

- Voie auditive
- Voies non auditives
- Perception et mécanismes auditifs fondamentaux
- Perception du son
- Résumé du chapitre

4 Audition et perception du son

Principales constatations

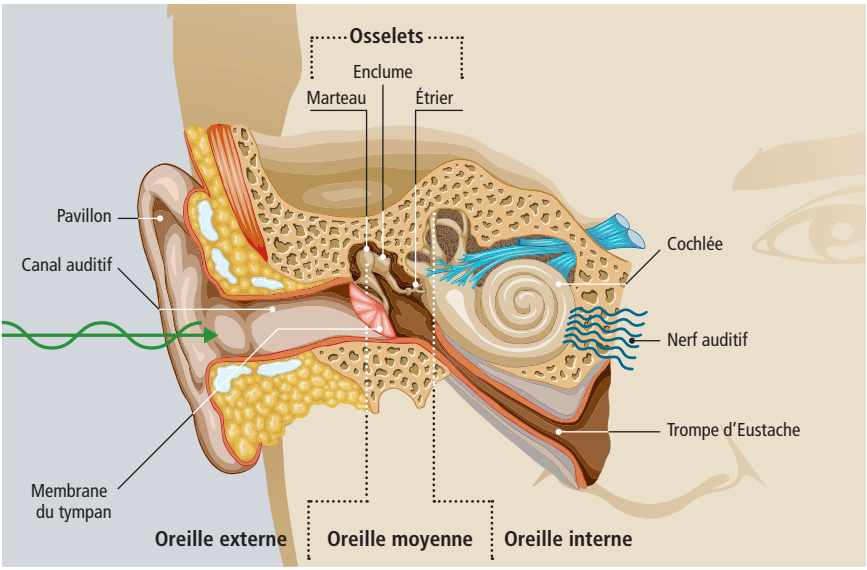
- Le son peut influer sur le corps humain par des voies auditives et non auditives. Dans le cas de la voie auditive, les sons atteignent la cochlée par conduction aérienne et osseuse. Ils y sont convertis en signaux neutres par les cellules ciliées. Les sons peuvent également stimuler le système vestibulaire ou transmettre des vibrations à l'ensemble du corps dans certaines conditions. Aux distances d'éloignement habituellement établies pour les éoliennes, la principale voie de transmission des sons est la conduction aérienne.
- Des seuils d'audition absolus ont été normalisés pour une population de référence de jeunes adultes. Ces seuils représentent les niveaux de pression acoustique les plus faibles auxquels le jeune adulte moyen peut entendre un son pur à différentes fréquences dans des conditions silencieuses déterminées. Toutefois, les seuils d'audition peuvent varier considérablement au sein de la population générale en raison de l'âge, de l'exposition préalable à des sons puissants ou à des agents ototoxiques, d'états médicaux et de plusieurs autres facteurs.
- Dans des milieux réels, où il y a des bruits ambiants, la détection des sons dépend aussi du niveau des sons masquants concurrents. En ce qui a trait au bruit produit par les éoliennes, il convient de considérer le seuil d'audition avec effet de masque, soit le niveau de pression acoustique auquel un son peut être perçu en présence d'autres sons (signaux acoustiques concurrents). Les attributs perceptibles des sons entendus dans l'environnement dépendent de leur contenu spectral (par exemple, un son tonal par rapport à un son à large bande), des caractéristiques temporelles (par exemple, continu ou modulé), de la bruyance (perception subjective de l'intensité sonore) et de plusieurs autres facteurs.
- Le son peut avoir des effets émotionnels et psychologiques qui doivent aussi être pris en compte.

Pour explorer comment le son des éoliennes peut influer sur les gens, il est important de comprendre comment il est traité par le corps humain et comment le même son peut avoir des effets différents sur différentes personnes en raison de facteurs physiologiques ou psychologiques ou d'états médicaux préexistants. Ce chapitre décrit comment le son est traité par le corps par la voie auditive et comment il peut activer des structures corporelles non auditives, telles que le système vestibulaire. Finalement, ce chapitre explore comment les gens peuvent ressentir différemment les effets du bruit et fournit un aperçu des facteurs non acoustiques qui influencent la perception des sons.

4.1 VOIE AUDITIVE

Avant d'être traités par le cerveau, les sons doivent d'abord atteindre l'oreille interne, qui les convertit en signaux neutres (voir la figure 4.1). L'oreille humaine peut se diviser en trois principales parties :

- L'oreille externe, composée du pavillon et du canal auditif, dirige les signaux acoustiques aériens vers la membrane du tympan.
- L'oreille moyenne, qui comprend la membrane du tympan et la délicate chaîne ossiculaire (osselets ou os minuscules), convertit les vibrations acoustiques en vibrations mécaniques qui sont transmises aux cavités remplies de fluide de l'oreille interne.
- L'oreille interne est composée de la cochlée et des organes vestibulaires cibles. Les cellules ciliées à l'intérieur de la cochlée détectent les ondes créées par les signaux mécaniques transmis par l'oreille moyenne et les convertissent en signaux électriques, qui sont transmis au cerveau via le nerf crânien cochléo-vestibulaire (VIII).



Reproduit avec la permission de l'Université d'Ottawa /University of Ottawa

Figure 4.1

Voie de transmission du son de l'environnement au cerveau

Les sons aériens pénètrent dans l'appareil auditif par l'oreille externe et font vibrer la membrane du tympan de l'oreille moyenne. La chaîne ossiculaire transmet les vibrations mécaniques aux cavités remplies de fluide de l'oreille interne. Les cellules ciliées de la cochlée de l'oreille interne convertissent les vibrations en signaux électriques, qui sont transmis au cerveau par le nerf auditif. Les vibrations mécaniques dans l'oreille moyenne peuvent aussi être induites par des vibrations crâniennes transmises par les os depuis d'autres parties du corps.

Les sons aériens font vibrer la membrane du tympan et les osselets de l'oreille interne. Dans l'oreille interne, le fluide contenu dans la cochlée se déplace en réponse à ces vibrations. On nomme la voie auditive que nous venons de décrire la *conduction aérienne*, mais celle-ci ne constitue pas la seule voie par laquelle un son peut être perçu par le cerveau. Les signaux acoustiques peuvent également générer des vibrations qui sont transmises à l'oreille interne par l'entremise des os. La voie de la *conduction osseuse* participe aussi à l'audition; lorsque nous parlons, nous entendons en bonne partie notre propre voix à travers les vibrations que transmettent les os (Hansen et Stinson, 1998). La conduction osseuse constitue une voie importante de transmission lorsque la tête (ou le corps) est reliée à un objet en vibration, qu'il s'agisse d'un objet interne (par exemple, l'appareil vocal) ou externe (par exemple, un appareil de stimulation mécanique placé sur le crâne). Par contre, dans le cas des sons externes, la conduction osseuse est de 40 à 60 dB plus faible que la conduction aérienne chez les personnes dotées d'une audition normale (Berger *et al.*, 2003). En conséquence, la conduction osseuse ne constitue une voie importante de transmission des sons externes que lorsque la voie aérienne est bloquée (par exemple, par l'utilisation d'un protecteur auditif à atténuation élevée). Ces conditions ne s'appliquent pas à l'exposition au bruit des éoliennes.

Les signaux auditifs subissent un traitement à plusieurs niveaux le long de la voie auditive, notamment au niveau du tronc cérébral et du mésencéphale, mais ne sont pas consciemment perçus comme un son jusqu'à ce que le cortex auditif soit activé.

4.2 VOIES NON AUDITIVES

Les sons peuvent aussi activer d'autres parties du corps qui ne font pas partie de la voie auditive, telles que le système vestibulaire, ou induire des vibrations globales du corps par la simulation mécanique directe des tissus corporels.

4.2.1 Système vestibulaire

Le système vestibulaire est une partie de l'oreille interne qui intervient dans les fonctions de l'équilibre et de l'orientation spatiale. Il peut être activé par certains signaux sonores et est par conséquent pertinent dans l'examen des effets possibles du bruit. Le système vestibulaire est composé de canaux semi-circulaires qui détectent les mouvements de rotation (accélérations angulaires) de la tête, et des otolithes, qui détectent la force de gravitation et les mouvements linéaires de la tête. Le système vestibulaire a plusieurs fonctions très importantes que nous remarquons rarement jusqu'à ce que les choses tournent mal. Par exemple, la stabilité des yeux est maintenue par la détection des mouvements de la tête, laquelle est assurée par les canaux semi-circulaires. L'équilibre est assuré en grande partie par le traitement des signaux transmis

par le système vestibulaire, lesquels sont combinés aux informations visuelles et aux signaux fournis par le système somatosensoriel. C'est ce qui nous permet de nous tenir debout et de nous orienter généralement dans l'espace. Dans leur fonction normale d'équilibrage, les cellules ciliées du système vestibulaire sont essentiellement activées par des mouvements beaucoup plus lents des fluides de l'oreille interne que ne le sont les cellules ciliées de la cochlée. En conséquence, les cellules ciliées vestibulaires sont généralement sensibles à des fréquences de vibration relativement basses. À titre d'exemple, les organes otolithiques sont plus sensibles aux signaux acoustiques d'une fréquence proche de 100 Hz (Todd *et al.*, 2008). Les informations fournies par le système vestibulaire sont transmises au cortex vestibulaire du cerveau, où elles sont traitées.

4.2.2 Vibrations globales du corps

En général, une source vibratoire doit exercer une stimulation mécanique directe (l'utilisation, par exemple, d'outils électriques) pour que se produise une vibration globale du corps. Toutefois, l'exposition à des niveaux de pression acoustique élevés peut aussi induire une certaine quantité de vibrations globales du corps (Takahashi, 2011). Les niveaux d'énergie acoustique générés par les éoliennes, aux distances d'éloignement ou aux niveaux acoustiques couramment spécifiés (voir les chapitres 2 et 3) sont beaucoup plus faibles que les niveaux qui pourraient avoir une incidence sur les tissus corporels.

4.3 PERCEPTION ET MÉCANISMES AUDITIFS FONDAMENTAUX

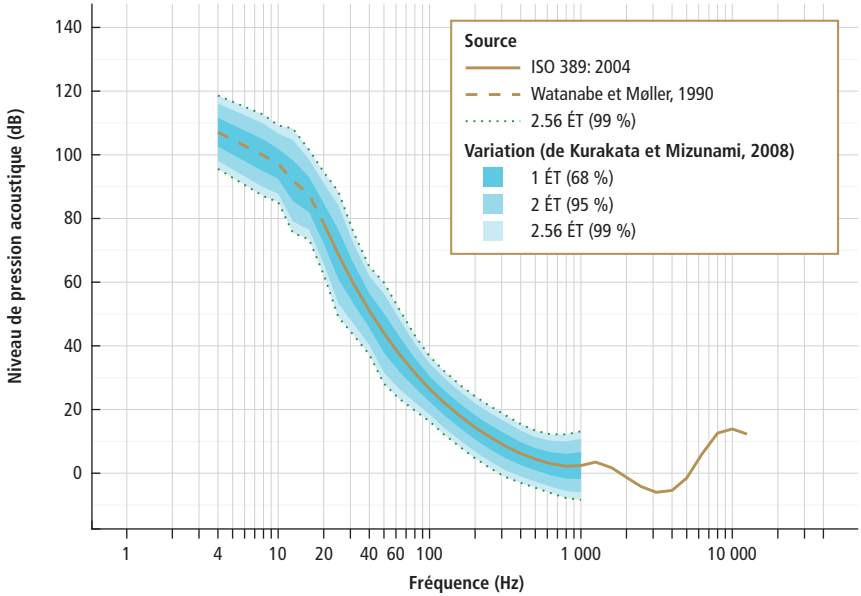
La perception du son dépend d'un grand nombre de facteurs, liés non seulement à la sensibilité physiologique, mais aussi à des facteurs psychologiques et externes. La perception auditive fondamentale peut être décrite à l'aide des composantes essentielles suivantes :

- la sensibilité auditive
- le seuil d'audition avec effet de masque
- la bruyance (sonie)

4.3.1 Sensibilité auditive

Les seuils d'audition reflètent à la fois la sensibilité de l'oreille d'une personne et l'aptitude d'une personne à percevoir un son dans son environnement. (D'autres facteurs ayant une incidence sur la perception du son sont abordés à la section 4.4.) Le *seuil d'audition absolu* est le niveau de pression acoustique le plus bas auquel une personne peut entendre un son pur dans un environnement très silencieux alors qu'elle est en état d'écoute attentive. Ce seuil varie selon la fréquence du son. Déterminer ce seuil est une façon parmi d'autres de mesurer la sensibilité auditive de sujets humains à diverses fréquences. L'oreille humaine

saine est plus sensible aux sons de 2 à 5 kHz (approximativement l'octave la plus aiguë du piano; le do central est à 261 Hz) et est moins sensible aux fréquences très basses et très hautes. La figure 4.2 montre la courbe du seuil d'audition absolu d'une population de référence de jeunes adultes ayant une audition normale. Elle présente les seuils d'audition associés à différentes fréquences sonores. Par exemple, à 1 000 Hz, le seuil moyen est de 4 dB, alors que pour les basses fréquences (< 20 Hz), le son n'est perçu qu'à des niveaux de pression acoustique de 90 à 100 dB ou plus. Il convient de souligner que même dans le cas de cette population de référence composée de jeunes adultes à l'audition normale, le seuil d'audition varie d'approximativement 20 dB d'une personne à une autre, comme l'indiquent les courbes de variance de la figure 4.2.



Source des données : ISO 389: 2004; Watanabe et Møller, 1990; Kurakata et Mizunami, 2008

Figure 4.2

Seuils d'audition absolus de l'oreille humaine

La courbe centrale continue ou en tirets indique le niveau de pression acoustique (dB NPA) auquel une jeune personne adulte peut normalement entendre un son pur en milieu conditionné, à la fréquence indiquée par l'axe du bas. La courbe représente le seuil médian : la moitié de la population est plus sensible et peut entendre les sons à des niveaux de pression acoustique plus bas, alors que l'autre moitié est moins sensible et ne peut les entendre qu'à des niveaux de pression acoustique plus élevés. Les bandes en bleu autour de la courbe indiquent des degrés de variation : la bande la plus foncée indique la plage de niveaux de pression acoustique dans laquelle approximativement 68 % des gens peuvent entendre un son d'une fréquence donnée (un écart-type) (voir Leventhall, 2009). Plus la fréquence est basse, plus le niveau de pression acoustique doit être élevé pour que le son soit entendu. Par exemple, un infrason (normalement un son d'une fréquence inférieure à 20 Hz) ne peut être entendu qu'au-dessus de 70 à 100 dB (Watanabe et Møller, 1990).

Dans la population générale, les seuils d'audition varient considérablement et peuvent être nettement supérieurs aux seuils audiométriques de référence de la figure 4.2 en raison d'un large éventail de facteurs, qui comprennent entre autres le vieillissement, l'exposition antérieure à des sons bruyants ou à des agents ototoxiques et les états médicaux des personnes considérées. Dans le domaine de l'audiologie, le niveau d'audition d'un patient s'exprime comme l'ampleur de l'élévation des seuils d'audition (mesurée en décibels de niveau d'audition [dB HL – pour hearing level]) par rapport à la courbe des seuils de référence absolus. Par exemple, une personne ayant un niveau d'audition de 40 dB HL présente des seuls d'audition absolus 40 dB supérieurs aux seuils de la figure 4.2. L'ampleur de l'élévation du seuil varie souvent selon la fréquence. Il existe différentes normes pour classer la gravité de l'élévation des seuils ou de la perte auditive d'une personne. Selon la classification de l'American Speech and Hearing Association, l'audition normale correspond à des niveaux d'audition inférieurs ou égaux à 15 dB HL, alors que la perte d'audition est classée selon une échelle variant de la surdité légère (16 à 25 dB HL) à la surdité profonde (91 dB HL et plus) (ASHA, 1981). L'encadré 4.1 fournit des détails concernant des états particuliers qui ont des incidences sur la sensibilité auditive.

Encadré 4.1
Groupes sensibles et pathologies

Lorsqu'on considère les effets des signaux acoustiques transmis par la voie auditive ou la voie vestibulaire, il faut être conscient que certaines personnes peuvent avoir un seuil d'audition plus bas que la normale et peuvent par conséquent être plus sensibles aux sons. Comme nous l'avons mentionné plus haut, les seuils d'audition peuvent varier d'autant que 20 dB, même chez les personnes ayant une audition normale.

Certains états peuvent aussi accroître la sensibilité auditive et abaisser les seuils d'audition. Par exemple, les personnes atteintes d'hyperacousie peuvent avoir une « intolérance inhabituelle aux bruits ordinaires environnants » [traduction] qui sont normalement tolérés par la majorité des gens (Baguley, 2003). Cet état peut être relativement répandu, la proportion de la population atteinte variant de 8 à 15 % selon les estimations. Concernant l'activation sonore possible du système vestibulaire, il a été établi que certains états pathologiques abaissent les seuils d'activation vestibulaire (un aqueduc du vestibule dilaté, une fistule périlymphatique ou la déhiscence du canal semi-circulaire supérieur par exemple). Même dans ces cas cependant, le niveau de pression acoustique requis pour activer le système vestibulaire est beaucoup plus élevé que le niveau des bruits produits par les éoliennes (Harrison, 2014).

4.3.2 Seuil d'audition avec effet de masque

Un seuil d'audition absolu est rarement approprié dans le contexte d'un son entendu dans un milieu réel, étant donné que d'autres sons et bruits empêchent la détection de sons aux niveaux de pression proches de ce seuil. Par conséquent, le *seuil d'audition avec effet de masqu*e est souvent utilisé pour les sons dans l'environnement. Il s'agit du niveau de pression acoustique auquel un son peut être entendu en présence d'autres sons (signaux acoustiques concurrents). Dans le contexte du bruit produit par les éoliennes, il convient de considérer le seuil d'audition avec effet de masque.

Encadré 4.2
Son, bruit et bruyance (sonie)

La *pression acoustique* est une mesure objective de l'amplitude d'une onde sonore. La *bruyance* est la perception subjective de l'intensité d'un signal après qu'il est détecté par l'oreille et traité par le système auditif. Un *bruit* se décrit comme un son jugé indésirable. Il peut être un signal acoustique concurrent dans l'environnement qui masque un son portant un intérêt, ou il peut être un percept sonore que des personnes tentent d'éliminer ou d'ignorer. À cet égard, le bruit est subjectif et dépend de la personne et du contexte.

4.3.3 Bruyance

Lorsqu'un son ou un bruit parvient à l'oreille humaine et surpasse le seuil d'audition avec effet de masque, l'ampleur de la sensation en réponse à ce son est appelée *bruyance* ou *sonie*. La bruyance est donc l'intensité d'une sensation auditive; elle est liée au signal acoustique physique à son origine, mais elle est distincte. En termes simples, les sons sont habituellement ordonnés selon une échelle s'étendant de doux à bruyant (Olson, 1972). La bruyance est une perception subjective de l'intensité d'un signal et dépend non seulement des caractéristiques du son, mais également de sa durée, de sa perception par le cerveau et de la présence d'autres sons. Comme pour les variations du seuil d'audition, la perception de la bruyance varie également d'une personne à une autre.

4.4 PERCEPTION DU SON

Le son peut exercer une influence sur le cerveau par la voie de mécanismes directs et indirects. La principale voie auditive se projette dans le cortex auditif primaire et est responsable de l'audition (c. à-d. de la perception du son). La voie indirecte, ou non primaire, est un système ascendant parallèle qui active

essentiellement des aires corticales associatives et le système limbique (par exemple, le complexe amygdalien). Cette voie est responsable de la réponse émotionnelle aux stimuli sonores. Pour déterminer les effets d'une exposition à un son et les réactions subséquentes au stress physiologique subi, les deux mécanismes doivent être pris en compte. Les caractéristiques du signal acoustique physique, telles que les caractéristiques spectrales (caractère tonal ou bien à large bande, par exemple) et temporelles (continu ou modulé), sont perçues suivant la voie directe alors que le contenu émotionnel des sons est perçu par le l'intermédiaire du système limbique, qui est activé par des voies non primaires (Spreng, 2000; Babisch, 2002; Münzel *et al.*, 2014). Lorsqu'un son est jugé désagréable, intrusif ou dérangeant, il est parfois défini comme un *bruit*.

4.5 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Le son atteint l'oreille interne via la conduction aérienne et la conduction osseuse. Les signaux sont ensuite convertis en signaux nerveux par les cellules ciliées situées dans l'oreille interne et sont traités par différentes parties du cerveau, de manière consciente et inconsciente. Les signaux acoustiques, en particulier les signaux de basse fréquence, peuvent aussi stimuler le système vestibulaire et cette stimulation survient à des niveaux plus bas chez des personnes ayant certains états de santé. Il faut généralement un contact direct avec une source vibratoire ou des niveaux de pression acoustique élevés pour que se produise une vibration globale notable du corps.

La perception auditive peut être décrite par la sensibilité auditive, le seuil d'audition avec effet de masque et la bruyance. Les seuils d'audition traduisent la sensibilité auditive d'une personne et son aptitude à remarquer un son dans son environnement. Les seuils d'audition absolus (dans un milieu silencieux, en état d'écoute attentive) varient considérablement au sein de la population générale, parfois d'autant que de 20 dB. Les seuils d'audition avec effet de masque tendent à être plus élevés que les seuils absolus et traduisent l'aptitude des gens à remarquer un son particulier pendant que lui parviennent d'autres sons concurrents. La bruyance est l'intensité de la sensation auditive et sa perception varie d'une personne à une autre. Certaines personnes peuvent être plus sensibles au son que la population générale, en raison d'une plus grande sensibilité auditive (seuil d'audition plus bas) ou d'une perception plus intense des sons.

Les signaux sonores sont traités par diverses parties du cerveau, via des mécanismes directs et indirects. Pour examiner les données probantes concernant les effets potentiels du bruit des éoliennes sur la santé, le comité d'experts s'est appuyé sur un schéma proposé par Babisch (2002), selon lequel les effets directs et indirects du bruit provoqueraient une activation physiologique (voir le chapitre 5).

5

Évaluations de la preuve

- Revues récentes des écrits sur le bruit des éoliennes et la santé
- Effets néfastes sur la santé proposés
- Prévalence des effets sur la santé signalés et plaintes liées au bruit au Canada
- Cadre conceptuel pour les effets sur la santé postulés
- Données probantes concernant le bruit des éoliennes et la santé humaine
- Soupeser et résumer la preuve
- Résumé du chapitre

5 Évaluations de la preuve

Principales constatations

- Le comité d'experts a répertorié 32 symptômes et états de santé attribués à l'exposition aux sons produits par les éoliennes, d'après un large examen de la littérature soumise à l'évaluation des pairs, de la littérature grise, de pages Web pertinentes et de décisions judiciaires rendues dans ce domaine.
- Les effets néfastes sur la santé les plus souvent attribués au bruit des éoliennes sont le dérangement, la perturbation du sommeil et des symptômes liés au stress. Cette constatation ne constitue pas une preuve de lien causal, mais soulève quelques préoccupations par rapport à des effets possibles sur la santé.
- Les recherches empiriques disponibles pour évaluer la preuve d'un lien causal entre le bruit des éoliennes et des effets néfastes sur la santé s'appuient sur une grande diversité de sources, y compris des articles évalués par des pairs, des actes de conférences, une thèse d'études supérieures, un livre et la littérature grise.
- Plus de 300 publications ont été trouvées par le biais d'une recherche exhaustive et ont été ramenées à 38 études pertinentes.

Pour remplir le mandat qui lui a été confié, le comité d'experts a élaboré une approche basée sur les concepts de la santé publique fondée sur des données probantes proposés en 2008 par le National Collaborating Centre for Methods and Tools de l'Université McMaster (Ciliska *et al.*, 2008). En termes généraux, lors de l'examen d'une question de santé publique, les données probantes existantes sur le problème et sa solution sont recueillies et soupesées d'après la robustesse des méthodes qui les sous-tendent et de leurs constatations; les conclusions sont basées sur le poids de la preuve. En utilisant cette approche, le comité d'experts a suivi trois principales étapes :

- Définir la question : le comité d'experts a commencé en dressant, depuis un large éventail de sources, une liste des effets sur la santé qui ont été attribués aux éoliennes. Les effets sur la santé relevés ont fourni des termes clés utilisés pour trouver des recherches empiriques pertinentes.
- Recherche et évaluation : le comité d'experts a cherché et évalué des articles de recherche empirique traitant des effets du bruit des éoliennes sur la santé humaine.
- Synthèse : le comité d'experts s'est appuyé sur les lignes directrices de Bradford pour soupeser le corpus de preuves et vérifier la plausibilité d'un lien causal entre l'exposition au bruit des éoliennes et des effets précis sur la santé (Bradford Hill, 1965). Outre les recherches empiriques traitant spécifiquement des éoliennes, des revues de la littérature et les résultats de recherches sur d'autres sources de bruit ambiant ont été utilisés lorsque pertinents et lorsque les données empiriques sur les éoliennes étaient

insuffisantes. Les constatations du comité d'experts concernant la causalité et l'état de la preuve dans chaque cas ont été résumés dans un langage normalisé (HCN, 1994; CIRC, 2006). La figure 5.1 illustre les principales étapes du processus d'examen entrepris par le comité d'experts.

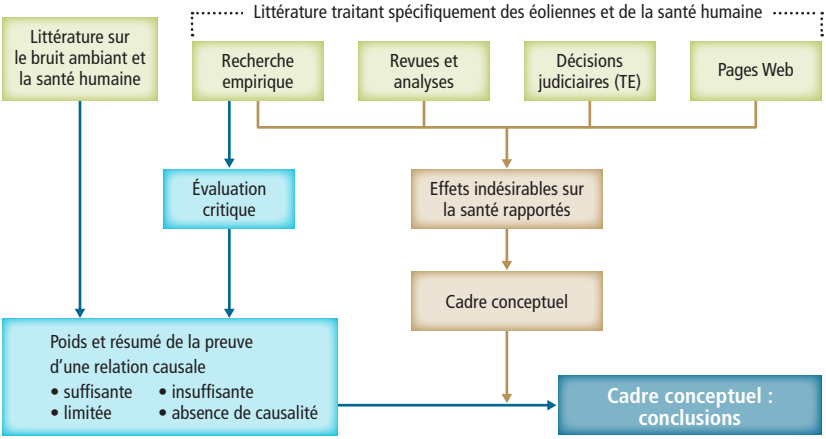


Figure 5.1

Processus d'évaluation de l'information disponible

Les lignes brunes désignent l'information utilisée dans la définition des effets potentiels sur la santé et dans l'élaboration des modèles de mécanismes pathogéniques; les lignes bleues démontrent le processus de revue de la littérature en lien avec les associations entre le bruit des éoliennes et chacun des effets potientiels sur la santé. Le comité d'experts s'est appuyé sur la littérature empirique, la littérature grise et des sources telles que des décisions judiciaires et des pages Web pour recenser les effets sur la santé possiblement liés au bruit des éoliennes. Un examen de ces effets a conduit à l'établissement d'un cadre conceptuel et à une recherche de données empiriques sur un lien entre eux et le bruit des éoliennes. Les données empiriques trouvées ont été évaluées de manière critique et jumelées à des recherches plus larges sur les effets du bruit ambiant. Les éléments de preuve relatifs à chaque effet sur la santé ont été examinés en suivant les lignes directrices de Bradford Hill. Les constats ont été résumés dans le rapport en empruntant le langage du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). Le cadre conceptuel a été mis à jour en tenant compte de ces constatations et présenté à la figure 7.1.

5.1 REVUES RÉCENTES DES ÉCRITS SUR LE BRUIT DES ÉOLIENNES ET LA SANTÉ

Plusieurs revues ont été publiées sur la littérature scientifique portant sur les éoliennes et la santé, dont quelques-unes au cours des cinq dernières années seulement. Parmi les plus récentes, on compte des revues commandées par

divers ordres de gouvernement (HGC Engineering, 2010; NHMRC, 2010, 2014; Masotti et Hodgetts, 2011; Ellenbogen *et al.*, 2012; Rod, 2012; Brisson *et al.*, 2013; Hodgetts et O'Connor, 2013; Merlin *et al.*, 2013), par des organisations sans but lucratif (par exemple, Sierra Club Canada, 2011) et par des organisations associées à l'industrie (par exemple, Colby *et al.*, 2009). D'autres revues ont été publiées dans des périodiques à comité de lecture (par exemple, Roberts et Roberts, 2013) ou autopubliés en ligne (par exemple, Frey et Hadden, 2012). En général, les constatations de ces revues sur les effets du bruit des éoliennes sur la santé humaine étaient contradictoires et n'ont pas été utilisées dans des évaluations importantes. Toutefois, le comité d'experts les a utilisées pour orienter et examiner la question dans le contexte actuel et pour garantir que les principales constatations étaient communiquées de manière précise.

5.2 EFFETS NÉFASTES SUR LA SANTÉ PROPOSÉS

Le comité d'experts a commencé par répertorier les états de santé et les symptômes plus souvent attribués au bruit des éoliennes. Il a employé une approche large pour constituer cette liste, laquelle comprend une revue des écrits scientifiques évalués par des pairs se rapportant au bruit des éoliennes, ainsi qu'un échantillon de la littérature profane, entre aux des pages Web, des rapports ou livres autopubliés et des décisions judiciaires sur le sujet. Chaque source a été fouillée pour trouver des mentions de symptômes attribués au bruit des éoliennes. Ces documents n'ont pas été évalués par le comité d'experts et les preuves sous-tendant les allégations de lien n'ont pas été évaluées à ce stade.

Vingt sites Internet (36 pages Web) ont été répertoriés d'après des références tirées de revues récentes, de la littérature empirique et d'une bibliographie dressée à partie de mémoires présentés à Santé Canada lors de consultations sur la conception d'une étude sur le bruit des éoliennes et la santé (Santé Canada, 2013a). Le moteur de recherche Google a été utilisé pour scruter chaque site (domaine Web) pour des pages publiées depuis 2009 sur le bruit des éoliennes et la santé humaine[3]. Ces pages comprenaient des entrées de blogues, des témoignages personnels et d'autres types de documents Web. Certains sites contenaient également des pages, facilement repérables depuis la page d'accueil, servant principalement à résumer les effets du bruit des éoliennes sur la santé. Ces pages ont aussi été scrutées dans le cadre du processus. De plus, des décisions rendues en Ontario, au Canada, par le Tribunal de l'environnement (TE) ont été scrutées pour répertorier les effets sur la santé allégués par les demandeurs ou décrits par les témoins experts.

3 Termes de recherche utilisés : (« wind turbine* » ou « wind farm* ») et (« sound » ou « noise ») et (« health » ou « sick » ou symptom*). Lorsqu'aucun résultat n'était obtenu, une seconde recherche était faite à l'aide des termes : « wind turbine », « noise » et « health ».

Seuls les effets sur la santé attribués aux éoliennes signalés au cours des cinq dernières années (de 2009 à 2014) ont été retenus, pour garantir qu'ils sont actuels et associés aux éoliennes commerciales modernes. Les modèles et conceptions plus anciens d'éoliennes produisent des niveaux sonores plus élevés, y compris des infrasons et des sons de basse fréquence, que les éoliennes plus modernes (voir la section 2.1). De plus, les facteurs de propagation du son des nouvelles et des anciennes éoliennes diffèrent du fait de la hauteur des éoliennes.

Le tableau 5.1 présente 32 états de santé qui ont été attribués[4] (proposés, mais non confirmés) au bruit des éoliennes dans divers types de sources (par exemple, une liste dressée de cas individuels autodéclarés). Cette liste a servi de point de départ au comité d'experts pour évaluer les preuves de causalité entre ces effets sur la santé et le bruit des éoliennes, mais ne constitue en aucun cas une preuve d'un lien causal.

Tableau 5.1

Effets sur la santé attribués (proposés, mais non confirmés) au bruit des éoliennes dans au moins trois documents examinés

État de santé ou symptôme	Étude évaluée par des pairs	Revue des écrits évaluée par des pairs	Actes de conférence	Élément de littérature grise	Décision judiciaire	Page Web
Nombre de sources consultées	20	5	6	13	5	36
Dérangement	•	•	•	•	•	•
Perturbation du sommeil	•	•	•	•	•	•
Stress, tension	•	•	•	•	•	•
« Qualité de vie liée à la santé »	•	•	•	•	•	•
« Maladie des effets vibratoires du son »		•	•			•
Système cardiovasculaire						
Maladie cardiovasculaire			•	•		•
Pression sanguine élevée (hypertension)		•		•	•	•
Arythmies (dysrhythmie cardiaque, tachycardie)	•	•	•	•	•	•
Système endocrinien						
Diabète		•	•	•	•	•

suite à la page suivante

4 Cette liste n'est pas exhaustive et n'a pour but que de cerner les principales questions. Un seul document source peut avoir fourni plusieurs états de santé et symptômes (points) présentés dans le tableau.

État de santé ou symptôme	Étude évaluée par des pairs	Revue des écrits évaluée par des pairs	Actes de conférence	Élément de littérature grise	Décision judiciaire	Page Web
Système immunitaire						
Immunité affaiblie				•		•
Système musculo-squelettique						
Douleur dorsale	•				•	
Douleur articulaire	•					•
Douleur musculaire (myalgie)	•				•	•
Tremblement (paralysie)	•			•	•	
Système nerveux (général)						
Performance cognitive ou de tâches	•	•	•	•	•	•
Perturbations des sensations épidermiques	•			•	•	
Fatigue	•	•	•	•	•	•
Céphalées	•	•	•	•	•	•
Nausées	•	•	•	•	•	•
Oppression de la poitrine	•					•
Sensation de vibration interne	•			•	•	•
Vertiges, étourdissements	•	•	•	•	•	•
Troubles de la vision			•	•	•	•
Système nerveux (auditif)						
Interférences dans la communication			•		•	•
Pression ou douleur dans l'oreille	•	•	•	•	•	•
Perte auditive			•	•		•
Acouphène	•	•	•	•	•	•
Santé psychologique						
Anxiété	•	•		•	•	•
Dépression	•	•	•	•	•	•
Irritabilité		•	•	•	•	•
Détresse psychologique	•	•	•	•		•
Système respiratoire						
Saignement de nez				•	•	•

Cette liste a servi de point de départ au comité d'experts pour évaluer les liens de causalité entre ces effets sur la santé et le bruit des éoliennes. Elle fait état des effets attribués au bruit des éoliennes, sans évaluer la preuve établie au regard de ces effets. Elle comprend des signalements individuels autodéclarés et des listes dressées à partir de plusieurs sources, telles que des pages Web et la littérature grise et des écrits évalués par des pairs. Chaque point correspond à une mention ou plus liée au type de document identifié, mais uniquement pour les symptômes mentionnés dans au moins trois documents distincts de tout type présenté. Les symptômes associés au « syndrome éolien » (Pierpont, 2009) sont considérés individuellement dans cette liste.

5.3 PRÉVALENCE DES EFFETS SUR LA SANTÉ SIGNALÉS ET PLAINTES LIÉES AU BRUIT AU CANADA

La capacité du comité d'experts à évaluer la prévalence des effets néfastes sur la santé liés au bruit des éoliennes au Canada était limitée en raison du manque de données disponibles. La surveillance de la santé publique en matière de maladies chroniques relève des gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux (Santé Canada, 2003a). Toutefois, aucun processus ou programme de surveillance en bonne et due forme n'a été mis en place au Canada pour relever les effets potentiels sur la santé liés au bruit des éoliennes. Le comité d'experts n'a pas pu, non plus, lors de son examen de la littérature, scruter les études canadiennes ou étrangères traitant de la prévalence de ces effets. En l'absence de telles données, il a été impossible d'estimer le fardeau de morbidité attribuable au bruit des éoliennes à partir des données sur (1) les maladies dont un lien de causalité avec le bruit des éoliennes avait été établi; (2) l'incidence de chacune de telles maladies au sein de la population générale; (3) la proportion de la population exposée au bruit des éoliennes; et (4) le risque accru de contracter la maladie associée à l'exposition au bruit des éoliennes. Toutefois, il est actuellement difficile de calculer ces estimations en raison du manque de données relatives aux quatre paramètres essentiels.

En 2013, le Pembina Institute a étudié les plaintes officielles présentées à diverses autorités albertaines concernant le bruit des éoliennes. Cette étude comprenait les plaintes adressées aux organismes de réglementation, aux municipalités et aux exploitants de parcs éoliens, couvrant approximativement 90 % de la puissance énergétique éolienne de la province (Thibault *et al.*, 2013). L'étude a permis de relever cinq plaintes liées à l'exploitation des éoliennes qui ont été déposées de 2007 à 2011 en Alberta. Les auteurs ont conclu que les plaintes de bruit transmises aux autorités par rapport aux éoliennes avaient été rares et certainement moins nombreuses que les plaintes liées aux activités des secteurs énergétiques traditionnels tels que l'exploitation du pétrole et du gaz (Thibault *et al.*, 2013).

L'utilisation des plaintes pour estimer la prévalence des effets sur la santé comporte des limites. L'Alberta n'est peut-être pas représentative de l'ensemble du Canada et la situation peut être différente dans d'autres régions du pays. Par exemple, il y a probablement beaucoup plus de plaintes en Ontario, vu le grand nombre d'affaires portées devant le Tribunal de l'environnement. Aucune partie indépendante n'a réalisé de recensement systématique des plaintes liées au bruit pour l'ensemble des territoires du Canada, probablement en raison de la disparité des mécanismes de signalement pour de telles plaintes ou rapports de santé et des processus de collecte des renseignements liés aux plaintes, mais aussi parce que ces plaintes ne se rapportent pas toujours à la santé (plutôt qu'à des enjeux de disparité économiques ou à l'impact visuel, par exemple). Toutefois, des études sur les plaintes liées au bruit ont été menées dans d'autres pays, notamment en Australie, où les politiques exigent que les plaintes liées au bruit transmises aux exploitants de parcs éoliens soient colligées et rendues publiques. Ces politiques rendent possible l'analyse de ces plaintes et on peut constater des inégalités dans la répartition des plaintes, lesquelles ont été transmises à certains parcs éoliens du pays en particulier, plusieurs années après la construction des installations. En Australie, de 2006 à 2012, 129 plaintes ont été reçues par les exploitants de parcs éoliens, ce qui correspond à approximativement 0,4 % de la population vivant à 5 km ou moins d'une éolienne (Chapman *et al.*, 2013). Cependant, on ne peut tirer des conclusions relatives à la probabilité des plaintes au Canada d'après les études réalisées dans d'autres pays sur de telles plaintes.

5.4 CADRE CONCEPTUEL POUR LES EFFETS SUR LA SANTÉ POSTULÉS

Le comité d'experts a élaboré un cadre conceptuel (figure 5.2) qui englobe les effets néfastes proposés, mais non confirmés, du bruit des éoliennes sur la santé décrits dans le tableau 5.1, ainsi que les possibles mécanismes reliant le bruit et la santé aux diverses caractéristiques des composantes du bruit des éoliennes. Ce cadre a été employé pour guider la recherche et l'évaluation des données probantes pertinentes concernant les relations causales entre le bruit des éoliennes et les effets sur la santé énumérés dans le tableau 5.1. L'analyse est présentée au chapitre 6 et une figure révisée (d'après l'évaluation des données et la conclusion finale du comité d'experts) est fournie au chapitre 7.

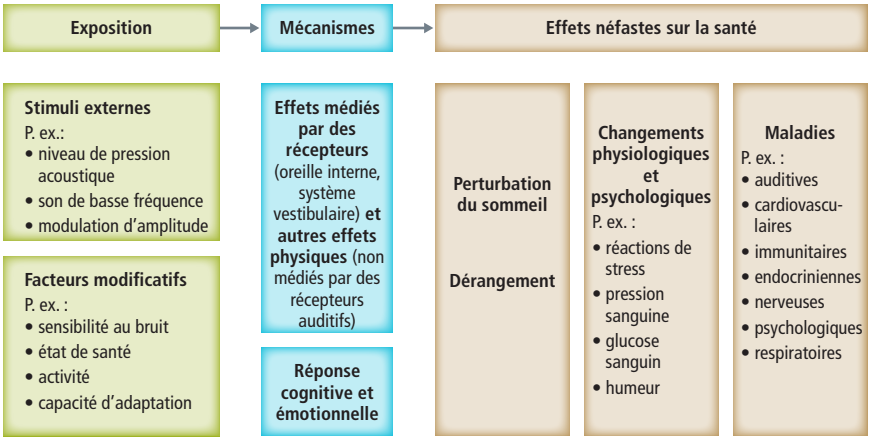


Figure 5.2

Éléments proposés de liens possibles entre le bruit des éoliennes et des effets néfastes sur la santé

Ce cadre propose des mécanismes physiques, dont certains sont médiés par des effets sur les récepteurs auditifs et vestibulaires, et des effets médiés par la réponse cognitive et émotionnelle des gens au bruit.

5.5 DONNÉES PROBANTES CONCERNANT LE BRUIT DES ÉOLIENNES ET LA SANTÉ HUMAINE

Les recherches empiriques utilisées pour évaluer les associations causales entre l'exposition au bruit des éoliennes et l'apparition d'effets néfastes sur la santé comprennent des articles soumis à l'évaluation des pairs et des actes de conférences. Le comité d'experts a aussi pris en considération des éléments de littérature grise, tels que des rapports techniques et des rapports publiés par des organisations à but non lucratif. Tous les documents présentant des résultats d'études empiriques ont été examinés (voir l'annexe B) et seules les études évaluant les effets des éoliennes commerciales modernes[5] (500 kW ou plus) ont été prises en compte.

5.5.1 Que nous disent les études scientifiques concernant un lien de causalité?

La possibilité de tirer des conclusions valables d'une étude sur la santé dépend largement de la qualité de cette étude. Dans une étude expérimentale, le chercheur détermine tous les aspects de l'étude, lesquels sont donc modifiables et reproductibles. Cela n'est pas possible dans la plupart des études de population

5 Toutes les éoliennes au Canada sont modernes (ont moins de 20 ans) et peu (1,6 %) ne sont pas d'échelle commerciale (< 500 kW). Voir la figure 2.1.

portant sur les effets sur la santé. Des facteurs comme le lieu de résidence et l'âge des personnes, le moment où une éolienne est installée et l'exposition au bruit ne peuvent être déterminés. Cela ne signifie pas que des études observationnelles (c'est ainsi que les épidémiologistes appellent les études sur les gens dans la « vraie vie ») sont nécessairement de qualité inférieure aux études expérimentales. Les études soigneusement élaborées et bien exécutées qui prennent en compte l'incidence de toutes les variables qui peuvent influencer les liens entre une exposition et un effet sont très convaincantes (Howick *et al.*, 2009). Les études observationnelles de grande qualité ont sous-tendu de nombreuses avancées majeures en santé publique au cours du dernier siècle, notamment l'établissement du lien entre le cancer des poumons et la cigarette, ou entre l'amiante et le mésothéliome.

Très peu d'études, s'il y en a, sont parfaites, répondant à tous les critères de qualité, mais cela ne signifie pas qu'elles soient sans valeur. Cela signifie, cependant, que la détermination d'une causalité est plus fiable lorsque cette détermination est basée sur le « poids de la preuve » fourni par de multiples études, en raison de facteurs comme la cohérence des constats établis par des études différentes sur les plans de la conception, des techniques d'analyse, des populations, etc. Un même constat de relation dans plusieurs études a conforté le comité d'experts dans son interprétation que le lien observé est causal et non une simple association.

5.5.2 Évaluer la qualité méthodologique d'une étude

La validité d'une étude est amoindrie par une conception défaillante, des erreurs de mesure ou l'omission de prendre en compte des facteurs de confusion (c.-à-d. des facteurs qui brouillent le rapport entre une cause et un effet, par exemple entre le bruit des éoliennes et le sommeil). Voici un bref exposé de certains des problèmes (ou biais) qui compromettent souvent la qualité globale d'une méthodologie et la validité d'une étude :

Conception de l'étude

La conception d'une étude influence fortement sa qualité méthodologique (voir l'annexe A). Un essai (ou une expérience) contrôlé randomisé est généralement considéré comme la meilleure conception d'étude, mais peut rarement être réalisé à l'échelle d'une population. Deux types de conception d'études longitudinales — les études de et les études cas-témoin — suivent une population cible pendant une période donnée. Les études basées sur ces conceptions analysent des « expériences naturelles », puisque le chercheur ne détermine pas les conditions dans lesquelles vit la population cible. On peut utiliser une conception et des outils d'analyse sophistiqués pour améliorer la validité des études de cohorte et des études cas-témoin. À l'autre bout du

spectre, on retrouve les études de cas; bien que ces études aient une certaine utilité pour relever initialement des liens possibles entre des expositions et des maladies, elles sont sujettes à de nombreuses formes de biais, ce qui en réduit la validité.

Taille des échantillons

Pour réduire l'incidence des différences aléatoires entre le risque pour les groupes exposés et non exposés de contracter une maladie, un certain nombre de participants ou de sujets à l'étude est requis. Généralement, les études menées à partir de groupes plus nombreux ont une plus grande puissance statistique que celles qui utilisent des groupes plus restreints pour déceler les effets qui sont moins prononcés (c.-à-d., les études plus vastes démontrent de manière plus certaine que toute différence observée entre les effets subis par deux groupes est vraie et non le fruit du hasard). Lorsque les études portent aussi sur des sous-groupes exposés (par exemple, les personnes de sexe masculin et féminin, plusieurs groupes d'âge) et plusieurs facteurs de confusion, la taille de l'échantillon pourrait devoir être très grande.

Facteurs de confusion

Les scientifiques craignent toujours que, lorsqu'ils décèlent un rapport possible entre une exposition et un effet, le rapport puisse avoir été causé par quelque autre facteur inconnu. Par exemple, si on découvrait que les adeptes de jeux du hasard étaient plus susceptibles de contracter un cancer du poumon, les chercheurs seraient plus réticents à y voir un lien causal, puisque les casinos sont des lieux enfumés; que l'acte de fumer est peut-être responsable, plus que le jeu, du taux plus élevé de cancer du poumon au sein de la population étudiée. On appelle ces facteurs des facteurs de confusion. Toutefois, les scientifiques ont plusieurs techniques à leur disposition pour neutraliser l'effet des facteurs de confusion sur la qualité de leurs études.

Classement erroné d'une exposition ou d'un effet

La qualité de la mesure d'une exposition (par exemple, au son des éoliennes) ou de l'effet (tel que la pression sanguine) a un lien très important avec la qualité de l'étude et sa validité. Une étude qui ne mesure pas précisément ces deux variables pourrait conduire à une erreur de classement où des sujets exposés seraient considérés comme des sujets non exposés et vice-versa. De même, sans une mesure précise d'un effet, une étude pourrait amalgamer des gens qui ne sont pas atteints par une maladie avec ceux qui le sont, ce qui aurait pour effet de « diluer » le groupe à l'étude. Dans ces deux exemples de classement erroné (d'une exposition ou des effets), le lien apparent entre une exposition et un effet peut être diminué par rapport au véritable lien, qui devient donc confus.

Lors de l'examen d'études, il est essentiel de déterminer avec quel degré de précision l'étude mesure l'exposition. Les études sur le bruit, par exemple, peuvent être très complexes parce que le bruit comporte plusieurs paramètres (amplitude, fréquence, variation dans le temps) qui caractérisent le signal acoustique auquel un sujet est exposé. Dans le cas d'un effet ou d'une maladie, une *définition de cas* (un « critère normal pour déterminer si une personne a une maladie particulière » ou présente un état particulier (Université Columbia, s.d.)) qui est systématique et idéalement fondée sur un test non biaisé, tel qu'un examen de la pression sanguine, est essentielle. Les effets autodéclarés sont généralement considérés comme plus susceptibles de donner lieu à des erreurs de classement ou à des résultats biaisés.

Biais de sélection

Les scientifiques doivent faire très attention à la façon dont les participants aux études sont recrutés pour éviter des biais qui pourraient fausser les résultats. Idéalement, une étude comprend une sélection aléatoire de personnes qui sont exposées ou non exposées (dans le cas d'une étude de cohorte), ou de celles qui ont une maladie et celles qui n'en ont pas (étude cas-témoin). Un biais d'autosélection peut être introduit si, par exemple, un scientifique demande à des volontaires de participer à une étude; les volontaires sont souvent ceux qui portent un intérêt particulier pour un sujet et peuvent différer de façons importantes de la population en général. Une sélection biaisée de sujets n'est pas représentative de la population générale et les résultats de l'étude associée pourraient par conséquent s'éloigner de la « vérité ».

Résumé

Les études épidémiologiques observationnelles peuvent constituer des outils très puissants pour découvrir et expliquer les associations causales — c'est-à-dire le fait qu'une exposition particulière cause une certaine maladie. Toutefois, la plupart des études ont des forces et des faiblesses et doivent être examinées attentivement pour déceler les problèmes qui pourraient diminuer leur validité, afin d'évaluer le corpus des connaissances acquises (c.-à-d. un ensemble d'études) et soupeser les preuves. D'autres facteurs tels que la plausibilité biologique et les données expérimentales doivent aussi être pris en compte dans l'évaluation de la causalité. Un bref aperçu des données probantes examinées est fourni à l'annexe B, qui sert de complément au chapitre 6.

5.6 SOUPESER ET RÉSUMER LA PREUVE

5.6.1 À la recherche de données empiriques

La recherche de preuves se voulait la plus exhaustive possible. Le comité d'experts a interrogé les données de base SCOPUS et PubMed à l'aide de mots clés se rapportant aux éoliennes, à la santé en général et à des états de santé plus particulièrement attribués au bruit des éoliennes (voir l'annexe B). Les résultats des recherches dans ces deux bases de données ont été combinés et les doublons ont été retirés. Plus de 300 articles publiés dans des périodiques à comité de lecture et actes de conférences datant de 1966 à 2014 ont ainsi été recensés. Le comité a scruté les résumés et titres de tous les documents de ces sources et a retenu les 33 articles et rapports les plus pertinents. Il a aussi pris en compte les données recueillies par Santé Canada pendant les consultations sur la conception d'une étude sur le bruit des éoliennes et la santé (Santé Canada, 2013b), les documents cités dans des examens clés de la littérature scientifique ainsi que les commentaires de ses membres. Au cours de ce processus, huit autres recherches, comprenant une thèse d'études supérieures, un livre et des éléments de littérature grise ont été ajoutées à la base de preuves. Au total, 38 études ont donc été incluses et ont fait l'objet d'une évaluation critique. Aucune limite relative à la date de réalisation des études n'a restreint leur inclusion, mais la pertinence de la conception des éoliennes examinées a été vérifiée. La qualité et la force probante des données présentées dans une étude empirique ont été examinées de manière critique à l'aide d'un questionnaire basé sur les facteurs d'évaluation utilisés par l'Agence de protection environnementale des États-Unis (Environmental Protection Agency) (EPA, 2003). Le comité d'experts s'est appuyé sur cet examen critique pour décrire les preuves recueillies.

Le comité a de plus élargi son champ de recherche à la littérature empirique portant sur les effets que produisent sur la santé certaines particularités du son produit par les éoliennes, telles que les infrasons, les sons de basse fréquence et la modulation d'amplitude. Le comité voulait ainsi rechercher des preuves additionnelles sur les possibles mécanismes pouvant avoir des effets sur la santé, là où il lui manquait des données. Il a aussi tiré d'autres données de publications évaluées par des pairs portant sur le bruit ambiant.

5.6.2 Évaluer de la causalité

Les études épidémiologiques ne peuvent déterminer la cause d'un effet sur une personne donnée, ou même le mécanisme responsable, mais elles peuvent établir une association entre une exposition donnée et la fréquence d'un effet au sein d'une population (par exemple, plusieurs études épidémiologiques ont évalué l'association entre la cigarette et le cancer du poumon). La causalité peut être inférée, habituellement d'après plusieurs facteurs, tels que la force et la

cohérence de l'association, la plausibilité du mécanisme ainsi que la temporalité et le gradient biologique — ou la relation dose-effet — de l'exposition et de l'effet (Bradford Hill, 1965; Howick *et al.*, 2009). De même que la cohérence, la spécificité (une association fiable entre une exposition et un ensemble d'effets) et la preuve expérimentale et analogique, ces critères ont été proposés par Bradford Hill (1965) pour évaluer la plausibilité de relations causales d'après des études observationnelles, même en l'absence d'expériences contrôlées randomisées.

Le comité d'experts a examiné de façon critique la documentation recensée pour évaluer et déterminer la force de la preuve recueillie sur le bruit des éoliennes et les effets sur la santé. Il a ensuite utilisé les lignes directrices de Bradford Hill pour guider ses délibérations et pour structurer les résumés de la preuve (chapitre 6), sachant que ces lignes directrices ne sont pas censées constituer des critères rigides et qu'elles doivent être appliquées à l'ensemble de la preuve et non à chacune des études considérées. La décision finale du comité d'experts concernant les liens possibles de causalité repose ultimement sur son évaluation des constatations tirées.

5.6.3 Résumer les constatations

Le comité a de plus adopté un vocabulaire normalisé pour résumer les constatations en matière de relations causales, suivant un cadre semblable à celui utilisé par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC, 2006), également adopté par le Conseil de santé des Pays-Bas (HCN, 1994). Selon ce cadre d'évaluation, la robustesse de la preuve sur une relation causale peut être cotée selon une des quatre catégories suivantes :

- **La preuve est suffisante pour établir une relation causale :** Une relation a été observée entre l'exposition au bruit des éoliennes et un effet spécifique sur la santé dans des études, où le hasard, les biais et les facteurs de confusion peuvent être exclus avec un degré suffisant de confiance.
- **Il y a des données limitées pour établir une relation causale :** Une association a été trouvée entre l'exposition au bruit des éoliennes et un effet sur la santé, pour laquelle l'interprétation est jugée plausible par le comité d'experts, mais où le hasard, les biais et les facteurs de confusion ne peuvent être écartés avec un degré suffisant de confiance.
- **La preuve est insuffisante pour établir une relation causale :** Les études disponibles sont d'une qualité insuffisante ou n'ont pas la cohérence ou la puissance statistique nécessaire pour conclure en la présence ou l'absence d'une relation causale.
- **Les données semblent indiquer qu'il n'y a pas de lien de causalité :** Il existe plusieurs études adéquates couvrant l'éventail complet des expositions qui démontrent de manière mutuellement cohérente qu'il n'y aurait pas de lien entre une exposition et un effet à aucun degré d'exposition observé.

5.7 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Le comité d'experts a tenu compte d'un éventail de preuves avec plusieurs objectifs :

- recenser les effets sur la santé dont un lien avec le bruit des éoliennes aurait été établi, prétendu ou signalé;
- définir un cadre conceptuel de mécanismes hypothétiques reliant le bruit des éoliennes aux effets possibles recensés;
- soupeser les preuves de ces relations causales.

Le comité d'experts a recensé 32 effets néfastes sur la santé potentiellement attribuables au bruit des éoliennes : la perturbation du sommeil, le dérangement et les effets du stress étaient effets les plus fréquemment mentionnés dans les sources examinées. Les écrits sur les effets recensés ont été systématiquement scrutés et examinés. Un nombre total de 38 études empiriques ont été choisies et évaluées en fonction de leur qualité méthodologique. Ces études ont été complétées par des articles évalués par des pairs tirés de la littérature sur le bruit ambiant que le comité d'experts a jugés pertinents pour son évaluation. Ce dernier s'est appuyé sur les lignes directrices de Bradford Hill en matière de causalité pour guider et structurer son évaluation, ainsi que sur un cadre inspiré par celui du Centre international de recherche sur le cancer pour résumer les constats établis sur les liens de causalité.

6

Preuves actuelles concernant les effets néfastes du bruit des éoliennes sur la santé

- Dérangement
- Perturbation du sommeil
- Stress
- Maladies cardiovasculaires
- Diabète
- Effets sur l'audition
- Acouphènes
- Effets des sons inaudibles sur l'oreille interne
- Performance cognitive et mentale
- Santé psychologique
- Qualité de vie
- Autres effets sur la santé
- Résumé du chapitre

6 Preuves actuelles concernant les effets néfastes du bruit des éoliennes sur la santé

Principales constatations

Des données probantes primaires sont disponibles pour certains, mais pas pour l'ensemble des effets sur la santé attribués au bruit des éoliennes. Les constatations suivantes sont basées sur les données primaires disponibles, tirées principalement d'études de population et, dans certains cas, d'études expérimentales :

- Les preuves actuelles sont ***suffisantes*** pour conclure qu'une relation causale peut être établie entre l'exposition au bruit des éoliennes et un dérangement; cependant, des lacunes dans les connaissances restent à combler concernant l'influence des caractéristiques spécifiques du son, telles que la modulation d'amplitude et le contenu en basses fréquences, ou des aspects visuels des éoliennes, qui ne se prêtent pas facilement à des études isolées.
- Les preuves actuelles sont ***limitées*** concernant une relation entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil. Les données probantes disponibles laissent penser qu'un mécanisme direct ou indirect pourrait exister, mais les facteurs de confusion ne peuvent être écartés avec un degré de certitude raisonnable.
- Les preuves actuelles sont ***insuffisantes*** pour établir la présence ou l'absence d'une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et le stress. Comme pour la perturbation du sommeil, les données disponibles indiquent qu'un mécanisme direct ou indirect pourrait exister; toutefois, ces données n'ont pas les qualités méthodologiques et statistiques voulues.
- Le comité d'experts a conclu que, selon les données actuelles, il n'y ***a pas de relation causale*** entre l'exposition au bruit des éoliennes et une perte auditive.
- Bien que des associations statistiquement significatives entre l'exposition au bruit des éoliennes et le diabète et les acouphènes aient été trouvées, ces associations ne sont pas constamment établies dans toutes les études et les preuves demeurent ***insuffisantes*** pour conclure en la présence ou l'absence de relations causales.
- Les recherches primaires ont aussi traité de sujets comme les maladies cardiovasculaires, les effets des sons inaudibles, les performances cognitives et mentales, la santé psychologique et la qualité de vie en général; toutefois, les preuves demeurent ***insuffisantes*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence de relations causales entre l'exposition au bruit des éoliennes et un de ces effets sur la santé.

Suivant le processus de recherche et d'évaluation qu'il a adopté (chapitre 5), le comité d'experts a examiné les preuves d'effets néfastes sur la santé et a évalué et résumé les preuves actuellement disponibles. Le présent chapitre traite des effets possibles sur la santé relevés dans le cadre de la recherche préliminaire des effets sur la santé (tableau 5.1) et présente les conclusions tirées par le comité d'experts sur les preuves actuellement disponibles concernant chaque effet recensé. Le tableau B.2 (présenté à l'annexe B) résume les preuves tirées des recherches empiriques menées sur les effets du bruit des éoliennes sur la santé. Le comité d'experts a identifié dans ce tableau les ensembles de données qui ont été consultés dans les articles examinés dans ce rapport et a donné à chaque ensemble de données un code identifiant le pays où l'étude a été faite et l'année où elle a été entreprise (par exemple, NL-07). Le tableau B.2 présente aussi un aperçu des principaux aspects méthodologiques de chaque étude. Les sections suivantes présentent un examen détaillé des données probantes recueillies sur tous les effets sur la santé qui ont fait l'objet d'études de population ou d'expériences en laboratoire. Les constatations du comité d'experts au regard de ces effets sont résumées au chapitre 7. Le comité a de plus considéré les possibles mécanismes de causalité reliant l'exposition au bruit des éoliennes à d'autres effets sur la santé mentionnés dans des séries de cas et d'autres sources, mais qui n'ont pas encore fait l'objet de recherches empiriques.

6.1 DÉRANGEMENT

Le dérangement causé par le bruit peut se définir comme « un sentiment de désagrément provoqué par un bruit » et « tout ressentiment, désagrément, inconfort ou irritation survenant lorsqu'un bruit perturbe les pensées et l'humeur d'une personne ou interfère avec ses activités » (Passchier-Vermeer et Passchier, 2006). Le dérangement est l'effet du bruit le plus fréquemment observé et étudié sur les gens. Le fait qu'une personne soit dérangée dépend des caractéristiques du son (par exemple, de son intensité, de la façon dont il varie dans le temps et des fréquences qui le composent), de facteurs liés à la personne (par exemple, sa sensibilité au bruit, son attitude à l'égard de la source sonore, son état physiologique et psychologique) et de facteurs circonstanciels et contextuels (par exemple, les activités menées ou qui doivent être menées par la personne, les attentes vis-à-vis du dérangement, les facteurs se rapportant à la source, tels que l'influence pouvant être exercée sur la source, la peur et la permanence). Le comité d'experts a utilisé cette définition descriptive large, mais souligne que dans la plupart des études décrites ci-dessous, les chercheurs ont utilisé des données tirées de questionnaires auxquels les participants ont répondu d'après leur propre perception et leur propre souvenir du dérangement.

L'analyse reprise par Pedersen (2011) de trois ensembles de données d'études (deux études suédoises, SWE-00, SWE-05, et une étude néerlandaise, NL-07) a révélé une association statistiquement significative entre l'exposition au bruit des éoliennes et le dérangement. Perdersen a constaté qu'une augmentation du niveau estimé de pression acoustique pondéré A correspondait à une proportion accrue des participants ressentant un dérangement. Dans ces trois ensembles de données, la proportion de répondants dérangés alors qu'ils se trouvaient à l'extérieur variait de 5 à 20 % dans la plage des 35 à 40 dB(A) et de 10 à 45 % dans la plage des 40 à 45 dB(A) (Persson Waye, 2009). Le dérangement est le seul effet du bruit des éoliennes sur la santé dont une corrélation a pu être systématiquement établie avec les niveaux de pression acoustique pondérés A recensés dans les trois ensembles de données. Les analyses préliminaires d'études réalisées en Pologne (POL-13) et au Japon (JAP-10) ont permis d'établir des relations exposition-réponse similaires entre les niveaux acoustiques pondérés A et un dérangement (Kuwano *et al.*, 2013; Yano *et al.*, 2013; Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2013; Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2014). Dans l'étude polonaise (Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2013), le pourcentage de répondants qui étaient dérangés (c.-à-d. ceux qui ont mentionné être « plutôt dérangés », « dérangés » ou « extrêmement dérangés » sur une échelle verbale à cinq niveaux) par leur exposition au bruit des éoliennes à l'extérieur augmentait de 27,1 % à 63,6 % lorsque l'intensité sonore passait de la plage des 35 à 40 dB(A) à la plage des 45 à 50 dB(A). De même, le pourcentage de sujets dérangés par une exposition au bruit des éoliennes à l'intérieur augmentait de 18,6 % à 23,4 % lorsque l'intensité sonore passait de la plage des 35 à 40 dB(A) à la plage des 40 à 45 dB(A), mais diminuait à 18,2 % lorsque l'intensité sonore atteignait la plage des 45 à 50 dB(A). Dans l'étude japonaise (Yano *et al.*, 2013), la proportion de répondants qui se disaient « très » ou « extrêmement » dérangés augmentait de 9,7 % à 22,6 % lorsque les niveaux d'exposition nocturne augmentaient de 30 à 45 dB(A)[6].

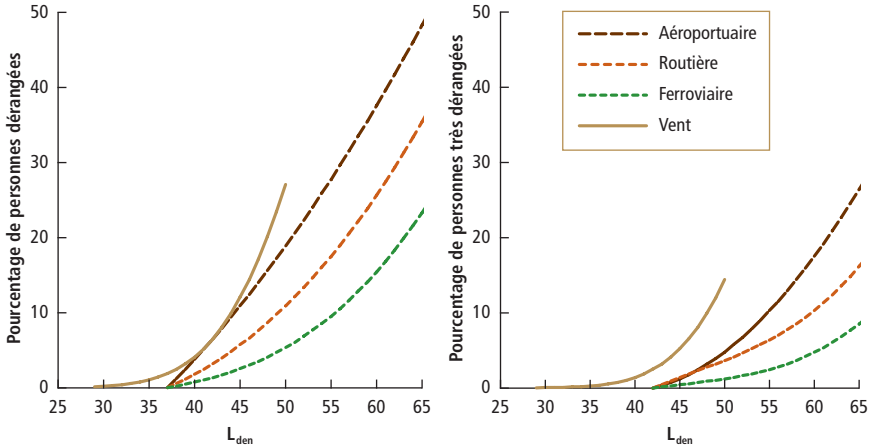
Jusqu'à maintenant, peu d'études ont été réalisées à partir de mesures réelles de l'exposition au bruit plutôt que de niveaux d'exposition estimés. Les mesures sonores sur le terrain sont coûteuses, chronophages et difficiles à uniformiser pour de larges échantillons de population. Par conséquent, les études basées sur des mesures sonores ont été des expériences de terrain plutôt que des études de population. Bockstael *et al.* (2012) ont réalisé des mesures sonores régulières dans huit foyers situés à 270 et approximativement 750 mètres de l'éolienne la plus proche parmi trois éoliennes. Les auteurs ont constaté que l'exposition

6 Bien que toutes les études emploient une échelle verbale à cinq niveaux, la terminologie de chaque article diffère. Par exemple, « extrêmement » et « très » dérangé dans Yano *et al.* (2013) correspond à « extrêmement dérangé » et « dérangé » dans Zajamsek *et al.* (2014) et à « très dérangé » et « plutôt dérangé » dans Pedersen (2011). Le langage utilisé introduit donc des différences, mais les résultats sont jugés comparables.

au bruit et le dérangement dépendaient de la vitesse du vent, de la direction du vent (c.-à-d. de l'angle de l'éolienne en rotation par rapport aux foyers exposés) ainsi que de la puissance des éoliennes. Magari *et al.* (2014) ont pris des mesures sonores à l'intérieur et à l'extérieur sur de brèves périodes à partir de 52 foyers situés à approximativement 400 à 800 mètres de l'éolienne la plus proche parmi un groupe d'éoliennes. Les mesures moyennes de L_{Aeq} étaient de 47 dB(A) (écart-type : 11,5 dB(A)) à l'intérieur et 45,3 dB(A) (écart-type : 8,2 dB(A)) à l'extérieur. Les chercheurs ont également sondé les résidents et les résultats de leur sondage ne permettaient pas de conclure en une relation exposition-réponse entre une exposition intérieure ou extérieure à court terme au bruit et un dérangement autodéclaré. Toutefois, les données ont révélé des corrélations entre l'exposition mesurée au bruit et des préoccupations au regard d'effets sur la santé, et entre l'exposition au bruit et la prévalence de perturbations du sommeil et du stress. Les auteurs ont remarqué que les études de cohorte dans lesquelles des mesures sonores ont été prises à l'intérieur et à l'extérieur sont nécessaires pour vérifier les résultats divergents des études d'après les mesures d'exposition calculées. Zajamsek *et al.* (2014) ont présenté une méthode visant à enregistrer simultanément des séries chronologiques de données sonores et les cotes de dérangement correspondantes fournies par des sujets exposés. Les auteurs ont mis à l'épreuve la méthode à deux résidences situées respectivement à 2,5 km et 8 km de distance de l'éolienne la plus proche. Bien que les données recueillies montrent des profils sonores qui varient avec la puissance des éoliennes, le lien entre le niveau acoustique global et le dérangement des résidents à ces distances s'expliquait mieux par la vitesse des vents dominants à proximité des résidences (Zajamsek *et al.*, 2014). Dans les études de population à grand échantillon prises en compte dans cet examen, le risque relatif de se trouver dérangé par le bruit des éoliennes augmentait en proportion des niveaux de pression acoustique estimés à l'extérieur, ce qui laisserait supposer l'existence d'une relation exposition-réponse entre le bruit des éoliennes et le dérangement (voir la figure 6.1).

Des relations exposition-réponse semblables basées sur le niveau de pression acoustique ont aussi été constatées lors d'expériences réalisées en laboratoire avec des sujets humains. Parmi celles-ci, Lee *et al.* (2011) ont mené une expérience pour déterminer le rôle de la modulation d'amplitude par rapport au dérangement. Des échantillons enregistrés de sons d'éoliennes ont été utilisés pour simuler l'exposition à une modulation d'amplitude d'une profondeur variant de 5 à 12 dB à des niveaux de pression acoustique équivalents variant de 35 à 55 dB(A). Les résultats indiquaient que le dérangement augmente en proportion avec le niveau d'exposition à une pression acoustique et avec la profondeur de la modulation d'amplitude du son des éoliennes. Seong *et al.* (2013) ont étudié le dérangement en utilisant des échantillons sonores représentant une exposition à différentes distances et positions angulaires relatives

à la direction du vent par rapport à l'éolienne, le L_{Aeq} variant approximativement de 25 à 50 dB(A). Maffei *et al.* (2013) et Ruotolo *et al.* (2012) ont utilisé des simulations audiovisuelles de la distance comme stimuli auditifs, notamment des enregistrements d'exposition réelle. Fastl et Menzel (2013) ont montré que le dérangement diminuait en fonction du niveau de pression acoustique chez les sujets exposés à des stimuli sonores soumis à une modulation d'amplitude d'une profondeur allant de 50 à 38 dB(A). Bien qu'aucune de ces expériences (Ruotolo *et al.*, 2012; Fastl et Menzel, 2013; Maffei *et al.*, 2013) n'ait été conçue pour vérifier une relation exposition-réponse, les résultats ont constamment démontré un lien entre une augmentation du niveau sonore des éoliennes et une augmentation des niveaux de dérangement chez les sujets exposés.



Reproduit avec la permission de Janssen, S. A., Vos, H., Eisses, A. R., et Pedersen, E. (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, 3746-3753. Copyright 2015, Acoustical Society of America

Figure 6.1

Comparaison entre le dérangement causé par le bruit des éoliennes et celui causé par le transport

Comparaison entre le pourcentage de résidents dérangés (à gauche) ou très dérangés (à droite) à l'intérieur par le bruit des éoliennes (vent) et le bruit de la circulation (aérienne, routière, ferroviaire) d'après les ensembles de données SWE-00, SWE-05 et NL-07. À des fins de comparaison, les mesures d'exposition au bruit sont exprimées en valeurs L_{den} calculées à partir des niveaux d'immission pondérés A déterminés dans les études originales conformément aux lignes directrices de l'Union européenne sur le bruit ambiant. L_{den} (niveau acoustique de jour(d)/soir(e)/nuit(n), aussi appelé niveau de bruit équivalent de bruit dans la collectivité ou CNEL) exprime le niveau acoustique moyen sur une période de 24 heures, auquel on ajoute 5 dB pour les heures en soirée (19 à 23 heures) et 10 dB pour les heures de nuit (22 heures à 7 heures). Le calcul de L_{den} est basé sur un protocole complexe qui comprend des coefficients correcteurs pour des conditions précises influençant l'exposition au bruit à l'emplacement de chaque répondant, tels que la vitesse des vents dominants et la direction ou la topographie.

Le dérangement peut être causé par une multitude de facteurs, y compris plusieurs qui surviennent souvent en même temps que l'exposition au bruit des éoliennes, tels que l'impact visuel des éoliennes. Les études passées en revue par le comité d'experts avaient neutralisé diverses combinaisons de facteurs contributifs, notamment la sensibilité autoévaluée au bruit (Pedersen et Persson Waye, 2004, 2007;Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2013); le bruit de fond produit par la circulation routière (Bakker *et al.*, 2012); le masquage possible du bruit des éoliennes par d'autres sources (Pedersen *et al.*, 2010; Van Renterghem *et al.*, 2013); les attitudes personnelles autoévaluées (Pedersen et Persson Waye, 2004; Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2013); l'influence du bruit ambiant sur le dérangement causé par le bruit des éoliennes (Bolin *et al.*, 2012), la participation aux retombées économiques de l'exploitation des éoliennes (Pedersen et Persson Waye, 2004; Janssen *et al.*, 2011); et les caractéristiques des environnements vivants (Pedersen et Larsman, 2008). L'association entre le bruit des éoliennes et le dérangement subsistait généralement même après avoir neutralisé ces facteurs. Quoi qu'il en soit, bien que les études transversales puissent neutraliser ces facteurs lors de l'évaluation de la relation entre le bruit des éoliennes et le dérangement, elles sont impuissantes à déterminer la temporalité d'une relation (c.-à-d., à savoir si les attitudes négatives résultent de l'exposition au bruit des éoliennes ou si elles influencent la perception du bruit).

Un facteur qui influe sur la perception du bruit des éoliennes et le dérangement occasionné par ce bruit est l'impact visuel des éoliennes. Dans plusieurs études, les résidents ayant une vue directe sur une éolienne étaient plus susceptibles d'être dérangés que ceux qui ne pouvaient voir aucune éolienne (Pedersen et Persson Waye, 2004; Pawlaczyk-Łuszczynska *et al.*, 2013). De même, les résidents qui appréciaient l'attrait visuel et le calme des paysages ruraux étaient plus susceptibles d'être dérangés que ceux que considéraient la campagne comme un lien de possibilités économiques (Pedersen et Persson Waye, 2004; Mulvaney *et al.*, 2013). Les expériences en laboratoire portant sur une exposition à court terme aux infrasons ont montré que les attentes positives et négatives pouvaient influencer de manière positive et négative respectivement les symptômes et les incidences sur l'humeur autodéclarés (Crichton *et al.*, 2014a, 2014b). Bockstael *et al.* (2013) ont constaté que les sujets qui pouvaient reconnaître le son des éoliennes parmi d'autres types de bruit ambiant étaient plus susceptibles d'être dérangés que les sujets qui remarquaient le son sans en reconnaître la source. Les auteurs ont soutenu que ces résultats appuyaient une voie causale hypothétique en vertu de laquelle remarquer une éolienne serait suivi d'une étape d'appréciation, dont le résultat influencerait le degré de dérangement (Bockstael *et al.*, 2013).

Pedersen *et al.* (2009) ont noté que du fait de la conception de leur étude, ils ne pouvaient exclure la possibilité que des attitudes négatives à l'égard des éoliennes soient causées en partie par l'exposition au bruit ou que le dérangement soit plus étroitement associé avec une intrusion visuelle qu'avec une exposition sonore (voir aussi Ellenbogen *et al.*, 2012). Pedersen et Larsman (2008) ont utilisé une série de modèles pour tenir compte simultanément de différents aspects de l'attitude, y compris de l'attitude visuelle et d'autres impacts des éoliennes, et ont constaté que l'association entre le bruit des éoliennes et le dérangement était significatif même lorsque d'autres facteurs étaient pris en compte, mais qu'une attitude visuelle négative augmenterait la probabilité d'une nuisance sonore pour les personnes vivant sur un terrain plat.

Janssen *et al.* (2011) ont utilisé les réponses des études suédoises et néerlandaise (SWE-00, SWE-05, NL-07) pour comparer la relation exposition-réponse entre le dérangement et le bruit des éoliennes avec la relation pouvant exister entre le dérangement et le bruit du transport aérien, routier et ferroviaire. Les auteurs ont constaté que le dérangement causé par le bruit des éoliennes survenait à des niveaux de pression acoustique relativement faibles, soit de 40 à 45 dB(A). Leur modèle a prédit que le pourcentage de personnes dérangées par le bruit des éoliennes à l'intérieur de leurs résidences serait plus élevé que le pourcentage de personnes dérangées par d'autres sources de bruit au même niveau de pression acoustique et que ce pourcentage augmenterait plus rapidement à des niveaux de pression acoustique croissants (figure 6.1).

Des recherches antérieures ont indiqué que la probabilité plus élevée de dérangement serait associée aux caractéristiques sonores particulières du bruit des éoliennes, dont la modulation d'amplitude et les tonalités générées. Par exemple, les participants à une étude expérimentale ont assimilé le bruit des éoliennes à un « clapotis », à un « bruissement » ou à un « sifflement » et ont jugé ces caractéristiques sonores dérangeantes (Persson Waye et Öhrström, 2002). Dans une autre expérience, Lee *et al.* (2011) ont utilisé des stimuli basés sur des échantillons sonores enregistrés qui avaient été traités pour simuler des sons à modulation d'amplitude de diverses profondeurs. Ils ont montré qu'un bruit d'éolienne dont l'amplitude est modulée est considéré comme plus dérangeant qu'un son continu de même fréquence et de même niveau acoustique moyen. D'après une expérience semblable, Seong *et al.* (2013) ont conclu qu'une mesure du niveau acoustique maximal pondéré qui fait état des pointes de modulation d'amplitude (L_{AFmax}) plutôt que des moyennes quotidiennes (L_{Aeq}) serait le meilleur indicateur d'un risque de dérangement. Un rapport récent produit par l'Université de Salford pour RenewableUK, un groupe de l'industrie éolienne, comprenait une série de tests d'écoute auxquels se sont soumis 20 participants. Pour ces tests, on a utilisé des stimuli

sonores basés sur des enregistrements de véritables éoliennes. Les stimuli étaient de modulation d'amplitude croissante pour un niveau L_{Aeq} constant (RenewableUK, 2013). L'objectif était de déterminer de manière préliminaire de combien il fallait élever le niveau d'un son non modulé pour qu'il soit perçu comme aussi dérangeant qu'un son modulé. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la profondeur de modulation conduisait à des niveaux accrus de dérangement. En moyenne, les ajustements requis pour exprimer la différence de bruyance perçue d'un son dont la profondeur de la modulation d'amplitude variait de 0 à 12 dB étaient de 3,5 dB pour un son de 30 dB(A) et de 1,7 dB pour un son de 40 dB(A). En d'autres termes, un son modulé d'un L_{Aeq} de 30 dB(A) était perçu comme aussi bruyant qu'un son non modulé de 33,5 dB(A) (von Hünerbein *et al.*, 2013).

Dans une étude semblable, Yokoyama *et al.* (2013) ont utilisé 52 stimuli de basse fréquence (1 à 250 Hz) à amplitude modulée produits à partir d'enregistrements du bruit d'éoliennes afin de déterminer le niveau subjectif de bruit perçu par 10 sujets. Les chercheurs ont constaté que le niveau de perception d'un bruit augmentait proportionnellement à l'augmentation de la modulation d'amplitude appliquée, même si la moyenne temporelle du niveau de pression acoustique demeurait inchangée (Yokoyama *et al.*, 2013). Bien que le nombre de participants à ces expériences ait été trop faible pour permettre une généralisation des constats, les résultats indiquent qu'un son à amplitude modulée pourrait être plus dérangeant que le même son à amplitude constante, pour un même niveau de pression acoustique. De plus, des niveaux accrus de dérangement pourraient être associés à la profondeur de la modulation dans une relation exposition-réponse (Yokoyama *et al.*, 2013). Von Hünerbein *et al.* (2013) ont aussi noté que, dans des conditions réelles, les caractéristiques spectrales (les tonalités générées) variaient en fonction de l'amplitude, les deux propriétés étant susceptibles d'influencer le niveau de dérangement. Ces constats concordent avec les résultats d'études réalisées sur d'autres types de bruit à amplitude modulée, tels que le bruit de systèmes d'échappement (Kantarelis et Walker, 1988) ou le bruit produit par les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (Bradley, 1994).

Certains chercheurs ont soutenu que le niveau accru de dérangement associé au bruit des éoliennes serait attribuable à ses composantes de basse fréquence. Des recherches antérieures ont montré que le bruit riche en basses fréquences produit par les ventilateurs était perçu comme plus dérangeant que d'autres types de bruit à des niveaux de référence supérieurs à 40 dB(A) (Persson Waye et Björkman, 1988). Cependant, jusqu'à ce jour, aucune étude de population n'a été menée pour mesurer l'exposition à des sons de basse fréquence, principalement parce qu'il est coûteux et techniquement difficile de mesurer

de façon appropriée les sons de basse fréquence (voir le chapitre 3 pour des informations plus détaillées sur la pertinence relative des différents types de mesure sonore).

Le dérangement est la réponse au bruit ambiant la plus fréquemment observée dans les collectivités (Basner *et al.*, 2014). Les constats concernant le dérangement provoqué par le bruit des éoliennes concordent avec les recherches portant sur d'autres types de bruit ambiant. Des associations étroites entre les bruits de la circulation routière et du transport aérien et le dérangement, basées sur des relations exposition-réponse, ont été établies dans de nombreuses études (Babisch *et al.*, 2003; Bakker *et al.*, 2012). Les recherches ont aussi montré que l'effet de dérangement causé par d'autres sources de bruit dépendrait des caractéristiques sonores de la source, dont la fréquence, la complexité et la durée du bruit, ainsi que de sa signification pour le sujet (Stansfeld, 2003). Il a également été démontré que différentes sources sonores provoqueraient différents niveaux de réaction dans les collectivités : à des niveaux acoustiques équivalents, le bruit des avions, par exemple, serait plus dérangeant que le bruit de la circulation routière, alors que le bruit du transport ferroviaire serait moins dérangeant que celui de la circulation routière (Miedema et Oudshoorn, 2001; Yano *et al.*, 2012). Comme pour le dérangement provoqué par le bruit des éoliennes, le dérangement généré par d'autres sources serait également influencé par les caractéristiques propres à chaque personne, comme la sensibilité au bruit, qui peuvent influencer la perception du niveau de dérangement indépendamment du niveau de pression acoustique associé à l'exposition sonore (van Kamp *et al.*, 2004).

6.1.1 Résumé des preuves sur le dérangement

Le comité d'experts a déterminé que les preuves relevées étaient ***suffisantes*** pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et le dérangement. Les données reliant le dérangement et le bruit des éoliennes montrent systématiquement qu'il existe une relation exposition-réponse entre le dérangement et l'exposition au bruit des éoliennes : plus le niveau de pression acoustique est élevé, plus le risque d'un dérangement augmente. Les constats établis par plusieurs études transversales menées avec des échantillons de grande taille dans différents environnements et différentes conditions d'exposition concordent et sont validés par les constats de recherches de conceptions différentes (par exemple, les études en laboratoire de courte durée).

Un vaste corpus de recherches a établi l'existence d'une relation exposition-réponse entre les niveaux acoustiques de diverses sources de bruit présentes dans les collectivités, telles que la circulation routière et ferroviaire et les aéroports. Les preuves relatives au dérangement causé par le bruit des éoliennes

établissent l'existence de relations exposition-réponse similaires et de liens avec ces autres sources de bruit. De plus, le bruit des éoliennes serait plus dérangeant que d'autres types de bruit à des niveaux de pression acoustique équivalents. Le profil spécifique de réponse semble correspondre aux caractéristiques acoustiques du bruit des éoliennes, par exemple la modulation d'amplitude, ainsi qu'aux facteurs particuliers qui influencent la perception du bruit des éoliennes, comme la sensibilité au bruit, l'impact visuel et l'attitude personnelle.

D'après les données probantes disponibles, l'influence de facteurs de confusion peut être écartée avec une certitude raisonnable. Des lacunes dans les connaissances subsistent quant à l'influence qu'exerceraient les impacts visuels sur la perception du bruit des éoliennes. Les preuves actuelles ne permettent pas de déterminer formellement si le dérangement est causé par l'exposition au bruit des éoliennes seulement ou si des facteurs tels que les impacts visuels et les attitudes personnelles modifient la relation bruit-dérangement — et dans quelle mesure, puisque les études réalisées à ce jour ne mesurent pas l'influence propre à chacun de ces facteurs. En outre, on en connaît encore peu sur la prévalence de base du dérangement, sur l'ampleur de l'effet et sur les seuils de perception du bruit des éoliennes par rapport à différentes conditions environnementales et topographiques.

6.2 PERTURBATION DU SOMMEIL

La perturbation du sommeil peut se définir comme « tout écart, mesurable ou subjectivement perçu, par rapport au profil de sommeil habituel d'une personne ou au profil désiré par elle » (Perron *et al.*, 2012). Parmi les indicateurs de perturbation du sommeil, on peut citer ceux-ci : la qualité du sommeil, la prise de somnifères, la durée totale du sommeil et la durée des divers stades du sommeil, les changements de stade du sommeil, l'éveil et les réveils (Perron *et al.*, 2012). Comme le souligne l'OMS, « le sommeil est une nécessité biologique et la perturbation du sommeil est associée à plusieurs effets néfastes sur la santé » [traduction] (OMS, 2009). Malgré l'importance démontrée du sommeil, la perturbation du sommeil est un phénomène répandu dans toutes les populations. Selon un sondage international, seulement 43 % des Canadiens affirment jouir quotidiennement ou presque de « bonnes nuits de sommeil », alors que 23 % disent que cela ne leur arrive que rarement ou jamais (NSF, 2013).

Le système auditif n'est jamais complètement au repos. Par conséquent, le bruit peut avoir un effet direct sur le sommeil (Griefahn, 2002; Persson Waye *et al.*, 2003; OMS, 2009). La perturbation du sommeil peut aussi se produire pendant que le sujet est dans un état inconscient, c'est-à-dire sans qu'il ne remarque la perturbation (Basner *et al.*, 2011), par exemple par l'activation du système nerveux autonome (Mathias *et al.*, 2008). Cela contraste avec le dérangement,

qui ne se produit que pour un bruit perçu consciemment. Cependant, la plupart des études sur le bruit ambiant et la perturbation du sommeil qui ont été évaluées par le comité d'experts s'appuyaient sur des effets sur le sommeil signalés de manière volontaire (à savoir les réveils ou la somnolence diurne liés à une diminution perçue de la qualité du sommeil).

La perturbation du sommeil peut avoir un effet néfaste sur les fonctions physiologiques. Le rythme circadien — un mécanisme important qui règle les rythmes, les activités et les cycles de repos quotidiens — peut être troublé par la perturbation du sommeil et son dérèglement par des influences externes (le décalage horaire ou les changements de quart de travail, par exemple) peut causer des problèmes de sommeil (Persson Waye *et al.*, 2003). Le bruit ambiant peut perturber les cycles réguliers du sommeil et causer des états de veille, qui incluent l'éveil végétatif et la sécrétion d'hormones de stress comme le cortisol (Maschke et Hecht, 2004). L'activation aiguë, ou le réveil complet, constitue une réponse physiologique d'importance majeure, mais des niveaux accrus de cortisol ont aussi été observés chez des personnes qui avaient été exposées à des niveaux de bruit accrus pendant le sommeil sans se réveiller (Ising *et al.*, 1999). De même, les effets du bruit sur le sommeil peuvent conduire à une stimulation du système nerveux sympathique (une partie du système nerveux autonome), une réponse inconsciente que la personne subissant la perturbation peut ne pas remarquer. Cela peut provoquer la sécrétion d'hormones comme l'adrénaline (épinéphrine), la noradrénaline (norépinéphrine) et le cortisol, et augmenter à long terme le nombre d'épisodes de perturbation du sommeil (Maschke et Hecht, 2004). L'exposition diurne à long terme au bruit, par exemple, conduit à une augmentation des niveaux minimaux de cortisol nocturne, ce qui se traduit par une diminution de la qualité du sommeil (durée du sommeil profond) et une probabilité accrue d'épisodes d'éveil nocturne (Fruhstorfer *et al.*, 1985). L'expression « perturbation du sommeil » décrit donc deux mécanismes différents : l'éveil aigu causé par l'exposition au bruit, qui est accompagné d'une sécrétion nocturne d'hormones de stress; et les effets à long terme de l'exposition diurne ou nocturne au bruit, qui modifient le profil et l'intensité de la sécrétion d'hormones de stress, diminuant par conséquent la qualité du sommeil, même en l'absence d'une perturbation aiguë nocturne.

Deux des trois ensembles de données (SWE-00 et NL-07) analysées par Pedersen (2011) pour sa nouvelle analyse ont révélé une association statistiquement significative entre l'exposition au bruit des éoliennes et des incidents autodéclarés d'interruption du sommeil. Les trois études ont aussi révélé une association statistiquement significative entre le dérangement et l'interruption du sommeil. De plus, l'interruption du sommeil a été associée plus étroitement avec un dérangement provoqué par du bruit subi à l'intérieur des constructions dans

les trois études (Pedersen, 2011). L'étude SWE-05, dans laquelle les éoliennes n'étaient pas toujours visibles en raison du relief prononcé, a révélé une augmentation plus faible du dérangement subi en proportion de l'augmentation des niveaux de pression acoustique à l'extérieur, mais une augmentation plus forte du dérangement en proportion de l'augmentation des niveaux de pression acoustique à l'intérieur, ainsi qu'une association plus étroite entre l'interruption du sommeil et le dérangement subi à l'intérieur (Pedersen, 2011). Ces constats indiquent que l'interruption du sommeil serait reliée au dérangement plutôt que directement à l'exposition au bruit des éoliennes. Ainsi, la perturbation du sommeil peut être une cause et une conséquence du dérangement associé à l'exposition au bruit des éoliennes.

D'après les données de l'étude néerlandaise (NL-07), Bakker *et al.* (2012) ont constaté que la moitié des répondants avaient fait état d'une perturbation du sommeil à un niveau de pression acoustique de 45 dB(A) ou plus. Pedersen (2011) et Bakker *et al.* (2012) ont tous deux noté qu'il n'était pas certain si la perturbation du sommeil était une conséquence directe de l'exposition au bruit des éoliennes ou une conséquence indirecte de l'état de dérangement causé par le bruit des éoliennes et d'autres facteurs présents à proximité de la résidence des sujets.

Nissenbaum *et al.* (2012) ont utilisé l'Index de qualité du sommeil de Pittsburgh (PSQI, pour Pittsburgh Sleep Quality Index) et l'Échelle de somnolence d'Epworth (ESS, pour Epworth Sleepiness Scale) pour tenter de déterminer s'il existait une association entre la distance de résidence par rapport aux éoliennes (< 1,5 km par rapport à > 3 à 7 km) et la qualité du sommeil ou la somnolence diurne. Bien que les auteurs aient conclu que la qualité du sommeil des résidents vivant plus près des éoliennes était diminuée, d'autres chercheurs ont soutenu que l'étude ne permettait pas d'arriver à cette conclusion en raison de ces limites, y compris un possible *biais de sélection*, la petite taille de l'échantillon et des données d'exposition de qualité médiocre (Ollson *et al.*, 2013). Conscient de ces limites, le comité d'experts a constaté que l'étude montrait bien une association entre l'exposition au bruit des éoliennes et des incidences sur le sommeil, mais dans une région différente de celles mentionnées dans les études néerlandaise et suédoises et suivant une méthodologie différente. Le comité a trouvé une étude (non publiée au moment de rédiger ce rapport) examinant les incidences de l'exposition au bruit des éoliennes sur une population rurale ontarienne. D'après des journaux du sommeil et des mesures actigraphiques de la qualité du sommeil, l'étude a montré que les résidents vivant à une distance de 474 à 1085 mètres de l'éolienne la plus proche avaient un sommeil d'une efficacité légèrement diminuée, une plus longue latence d'endormissement et de plus longues heures d'éveil après l'apparition du sommeil, mais aucune

de ces différences n'était statistiquement significative. L'étude était limitée par la petite taille de l'échantillon (23 participants et 110 observations personne-nuit) et des vitesses de vent et un régime de fonctionnement des éoliennes relativement faibles pendant la période d'observation (Lane, 2013). L'étude WindVOiCe, un sondage rempli par les intéressés, a montré ce que ses auteurs ont décrit comme une association « modérément significative » (valeur de p = 0,0778, ce qui est plus élevé que la signification statistique classique, où p = 0,05) entre la perturbation du sommeil et l'éloignement par rapport aux éoliennes (Krogh *et al.*, 2011).

Le comité d'experts n'a trouvé aucune étude ou expérience sur le sommeil ayant mesuré l'effet du bruit des éoliennes sur la physiologie du sommeil à l'aide de méthodes standard telles que la mesure des ondes cérébrales (électroencéphalographie, ou EEG).

D'autres types de bruit ambiant ont été associés à des effets sur le sommeil. Par exemple, on a démontré que la perturbation du sommeil était une conséquence directe de l'exposition au bruit de la circulation routière et aérienne (Öhrström et Rylander, 1982; Öhrström, 1989; Perron *et al.*, 2012). Dans un examen des preuves existantes, l'OMS (2009) a constaté que l'exposition à des niveaux de pression acoustique aussi faibles que 32 dB(A) avait des effets biologiques sur la qualité du sommeil. Dans un examen sur le bruit et le sommeil, Muzet (2007) a noté que des stimuli sonores externes déclenchaient des réponses autonomes, telles que des changements dans la fréquence cardiaque et de la vasoconstriction, même lorsque la personne demeurait endormie. Dans une étude en laboratoire, Basner *et al.*, (2011) (N=72 participants) ont montré que l'exposition au bruit de la circulation ferroviaire, routière et aéroportuaire conduisait à des changements statistiquement significatifs dans la continuité du sommeil (mesurée comme étant une combinaison de la latence d'apparition du sommeil, du nombre de périodes d'éveil, du nombre de réveils et du nombre de changements de stade du sommeil). De plus, il y avait une différence entre les incidences mesurées sur la structure et la continuité du sommeil et l'évaluation subjective de l'influence des différents types de bruit de circulation sur la qualité du sommeil. « Alors que le bruit de la circulation routière conduisait aux changements les plus notables dans la structure et la continuité du sommeil, le bruit de la circulation aérienne et ferroviaire » nocturne était perçu comme étant plus dérangeant (Basner *et al.*, 2011). Dans des recherches sur l'effet de la variabilité temporelle du bruit ambiant, on a montré que le bruit continu avait un effet statistiquement plus faible sur la qualité du sommeil que le bruit intermittent (Öhrström et Rylander, 1982; Persson Waye *et al.*, 2003). Le bruit intermittent influence principalement le sommeil profond, alors que le bruit continu à des niveaux d'exposition de 36 à 55 dB(A) est associé à une diminution de la durée du sommeil paradoxal (Eberhardt *et al.*, 1987).

Comme nous l'avons mentionné plus haut, aucune étude n'a jusqu'à maintenant examiné les effets spécifiques de l'exposition au bruit riche en basses fréquence des éoliennes. Le comité d'experts a trouvé deux études de terrain sur d'autres types de bruit ambiant qui ont été réalisées pour vérifier si l'exposition à des sons de basse fréquence avait des effets particuliers sur le sommeil (Nagai *et al.*, 1989; Persson Waye et Rylander, 2001). Nagai *et al.* (1989) ont décrit les effets liés à une exposition aux sons de basse fréquence produits par la circulation routière, à des niveaux variant de 72 à 85 dB(A). Les sujets ont aussi été exposés au tremblement et au cliquetis des fenêtres engendrés par la circulation autoroutière. La combinaison de ces perturbations a causé de l'insomnie et une fatigue excessive (Nagai *et al.*, 1989). Une autre étude a montré que les personnes exposées au bruit d'une thermopompe ou d'appareils de ventilation dans leurs maisons (26 à 36 dB(A), ce qui correspond à des niveaux de 49 à 60 dB(C)), étaient nettement plus susceptibles de faire état d'un dérangement et d'éprouver une perturbation de la concentration et du repos que les résidents exposés à des bruits produits par des sources semblables, mais sans composantes de basse fréquence (Persson Waye et Rylander, 2001).

6.2.1 Résumé des preuves sur la perturbation du sommeil

Une association entre le bruit des éoliennes et l'interruption du sommeil ou une diminution de la qualité du sommeil a été trouvée dans quelques études observationnelles, mais les études ne concordaient pas toutes sur ce plan. Une association directe entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil n'a été observée que dans deux études de population, alors que trois études concordaient pour conclure que la perturbation du sommeil était associée à un dérangement causé par une exposition au bruit. De plus, la relation exposition-réponse n'a pas encore été établie avec certitude. Le comité d'experts a conclu par conséquent que les preuves actuelles d'une relation causale sont ***limitées***. Les preuves liées aux éoliennes concordent généralement avec les constats des études menées sur les effets produits par d'autres sources de bruit sur le sommeil. Bien que la perturbation du sommeil ait été examinée dans plusieurs études, la base de preuves résultante est plus mince (des études moins nombreuses et moins concordantes, moins de participants par étude) que pour la relation entre le bruit des éoliennes et le dérangement.

Sur le plan des connaissances, la principale lacune à combler concerne la nature du mécanisme causal. Il n'a pas été établi avec certitude si la perturbation du sommeil peut résulter directement de l'exposition au bruit des éoliennes et dans quelle mesure la perturbation du sommeil observée serait une conséquence indirecte du dérangement. Il n'y a actuellement aucune expérience ou étude sur le sommeil disponible qui démontre une incidence du bruit des éoliennes sur la physiologie du cerveau pendant le sommeil, évaluée par des mesures

traditionnelles du sommeil telles que l'EEG. Parmi les autres lacunes à combler, on peut inclure les effets sur le sommeil liés aux caractéristiques particulières du son émis par les éoliennes, telles que les composantes de basse fréquence ou la modulation d'amplitude périodique.

6.3 STRESS

Le terme *stress* a une signification large et englobe généralement des facteurs de nature physique, biologique ou psychologique qui poussent une personne tout près ou au-delà de sa capacité d'adaptation (Welford, 1974; Gemmert et Van Galen, 1997). Les conditions de stress pour les humains comprennent des facteurs tels que les températures extrêmes, la surcharge de travail, le bruit ou les pressions sociales (Broadbent, 1971; Van Gemmert et Van Galen, 1997). Ces stresseurs, ou facteurs de stress, sont généralement classés selon qu'ils agissent sur le plan affectif (liés aux émotions ou aux traits de personnalité), cognitif (liés à la charge mentale au moment où la personne est confrontée à des tâches complexes) ou physique (liée à la charge physique imposée par l'environnement physique) (Van Gemmert et Van Galen, 1997). Le même stresseur peut avoir de multiples effets. Par exemple, le bruit peut interférer avec l'activité cognitive et déclencher une réponse émotionnelle à la source du bruit.

Le bruit ambiant est un stresseur physique répandu chez les gens qui vivent en milieu urbain ou dans d'autres environnements exposés à des niveaux élevés de bruit ambiant (Van Gemmert et Van Galen, 1997). L'exposition au bruit peut causer du stress directement, comme effet physique, ou indirectement, comme une conséquence du dérangement. Babisch (2002) a réalisé un examen exhaustif d'un mécanisme direct de réaction de stress au bruit : l'exposition au bruit active le système nerveux sympathique et le système endocrinien, ce qui conduit à une augmentation des niveaux d'hormones de stress telles que l'épinéphrine, la norépinéphrine et le cortisol. Ces hormones affectent le métabolisme et l'immunité procurée par les anticorps et agissent comme des médiateurs le long de la voie menant du bruit aux maladies liées au stress (Babisch, 2002). Des changements dans les niveaux de ces hormones provoquent aussi des effets physiologiques, y compris des changements de pression sanguine ou des facteurs de coagulation sanguine (voir Babisch *et al.*, 2003 pour un résumé des recherches sur le modèle général du stress).

Le bruit peut aussi causer indirectement du stress par l'entremise du dérangement. Kalveram *et al.* (1999) ont soutenu que le bruit, en combinaison avec des informations sur la source du bruit, provoquerait un dérangement. Cette situation peut déclencher un « signal de perte possible de condition physique », signifiant que la condition physique pourrait décliner si la personne demeure dans la même situation (Kalveram *et al.*, 1999). Un tel signal peut entraîner des

comportements de repli sur soi, d'agression, d'attente ou d'adaptation. Bien que les réactions de stress soient normales et généralement bénéfiques, on estime qu'elles deviennent pathologiques si elles sont chroniques ou fréquentes, spécialement si elles ne se résolvent pas de manière appropriée. Conformément à ce modèle, Babisch (2002) a soutenu que le dérangement causé par le bruit entraînerait une activation physiologique et un stress.

Aucun des trois ensembles de données analysés par Pedersen (2011) n'a montré une association statistiquement significative entre l'exposition à des niveaux estimés de pression acoustique pondérés A liés au bruit des éoliennes et des perceptions autodéclarées de stress; toutefois, les trois études ont fait état d'une relation positive entre le dérangement causé par le bruit des éoliennes entendu à l'extérieur et le stress (Pedersen, 2011). La conception des études n'a pas permis de tirer des conclusions en matière de cause et d'effet : le dérangement pourrait être une conséquence du stress, ou vice versa. Utilisant les données de l'étude néerlandaise (NL-07), Bakker *et al.* (2012) ont déterminé qu'une corrélation indirecte pouvait être établie entre la détresse psychologique et l'exposition au bruit chez les répondants qui remarquaient un bruit d'éolienne, le « dérangement causé par le bruit agissant comme un médiateur ».

Dans un article de synthèse, Baqtasch *et al.* (2006) ont noté que le stress causé par les éoliennes constituait une des variables modulant le dérangement. L'augmentation de la taille des éoliennes soulève aussi des préoccupations liées au fait que le spectre sonore émis se décale vers les fréquences plus graves (Møller et Pedersen, 2011); toutefois, Shepherd *et al.* (2011) ont aussi fait ressortir des liens entre le bruit des éoliennes, le stress et le dérangement, soutenant que ces liens seraient exacerbés parce que l'exposition chronique au bruit constitue un facteur de stress psychosocial puissant pouvant entraîner un stress chronique (Shepherd *et al.*, 2011).

Pedersen (2011) a soutenu que la théorie du stress cognitif pouvait expliquer le lien entre le dérangement causé par le bruit des éoliennes et le stress (voir aussi Lazarus et Folkman, 1984). D'après cette théorie, une personne dans une situation déjà stressante évaluerait le bruit des éoliennes comme une menace additionnelle à la récupération. Puisque la source du bruit échappe à l'influence de la personne, la réaction se manifeste sous forme de dérangement. Il est bon de souligner, cependant, que les gens qui ont affirmé être dérangés par le bruit des éoliennes ont aussi fait état d'autres symptômes de stress ainsi que d'effets secondaires qui en découlent, tels que la sensation d'être moins bien reposés, et qu'ils jugeaient leur environnement moins propice au repos et à la récupération (Pedersen *et al.*, 2007a; Pedersen et Persson Waye, 2008).

Bien que l'association entre le dérangement causé par le bruit des éoliennes et le stress ait été établie de façon constante dans toutes les études ayant examiné les variables liées au stress, le stress n'a pas été associé directement à une exposition au bruit des éoliennes. Le comité d'experts n'a pas trouvé d'études ou d'expériences ayant vérifié si le stress pouvait être directement influencé par les caractéristiques particulières du bruit des éoliennes.

Une réaction indirecte de stress découlant du dérangement éprouvé a aussi été étudiée par rapport à d'autres sources de bruit ambiant, en particulier l'exposition au bruit de la circulation routière. Le dérangement et le stress chronique ont été reliés dans de nombreuses études (le plus souvent se rapportant au bruit ambiant en milieu de travail ou au bruit de la circulation routière); toutefois, une relation causale n'a pas été établie. Dans sa synthèse, Rylander (2004) a noté, par exemple, qu'il n'y a pas de données disponibles sur la relation entre le dérangement et le cortisol présent dans la salive (un indicateur de stress) dans des conditions d'exposition chronique ou aiguë au bruit ambiant.

6.3.1 Résumé des preuves sur le stress

Le comité d'experts n'a pas trouvé de preuves d'une association directe entre le bruit des éoliennes et le stress. Toutefois, plusieurs études ont établi des associations indirectes entre le dérangement causé par le bruit des éoliennes et le stress. Le stress a été associé avec le dérangement découlant d'une exposition à l'extérieur au bruit des éoliennes dans trois études, mais dans une étude seulement pour une exposition à l'intérieur au bruit des éoliennes. De plus, le stress n'a pas été le principal résultat examiné dans les études réalisées à ce jour. Les ensembles de données présentant des résultats liés au stress (SWE-00, SWE-05, NL-07) et les études résultantes qui ont examiné la relation avec le stress (Pedersen et Persson Waye, 2008; Pedersen, 2011; Bakker *et al.*, 2012) se limitaient à des données autodéclarées, qui ne sont pas traitées de manière uniforme dans les différentes études. Les études disponibles ne sont pas d'une qualité suffisante au regard du stress et n'ont pas la puissance statistique voulue pour permettre de tirer une conclusion sur la présence ou l'absence d'une relation causale entre le bruit des éoliennes et le stress. Le comité d'experts a par conséquent conclu que les preuves actuelles d'une relation causale étaient ***insuffisantes***.

Le comité a relevé, toutefois, que les profils de réactions de stress autodéclarées concordaient généralement avec les liens entre des réactions de stress observés dans un vaste corpus de recherche sur les effets d'autres bruits ambiants. Ces associations n'ont pas encore été vérifiées par rapport au bruit des éoliennes à l'aide de méthodes comparables. Nous ne savons pas, par conséquent, si le bruit des éoliennes a des effets sur le stress semblables à ceux d'autres types de bruit.

Les autres lacunes dans les connaissances ont trait à la nature du mécanisme sous-jacent, en particulier à savoir si le stress peut être causé directement par une exposition au bruit des éoliennes ou s'il est une conséquence indirecte du dérangement, de la perturbation du sommeil ou des deux à la fois.

6.4 MALADIES CARDIOVASCULAIRES

Les maladies cardiovasculaires constituent un ensemble de troubles affectant le cœur et les vaisseaux sanguins (par exemple, la coronaropathie). Les maladies cardiovasculaires sont de plus associées à de multiples causes liées à des facteurs de risque comme la mauvaise alimentation, le manque d'exercice physique, le tabagisme, l'environnement ou les états de santé préalables héréditaires (OMS, 2013). Ces maladies ont une forte prévalence au sein de la population en général. Par exemple, les maladies cardiovasculaires étaient responsables de 32 % de tous les décès prématurés au Canada en 2004 et ont été le deuxième poste de dépenses en importance liées aux soins de santé en 2000 (ASPC, 2009). Compte tenu de la relation complexe qui existe entre les multiples facteurs de risque et leurs effets, il est difficile d'associer le risque de contracter une maladie cardiovasculaire avec une cause unique comme le bruit des éoliennes. Aucune étude de qualité conçue pour examiner les états de maladie cardiovasculaire et leur relation avec l'exposition au bruit des éoliennes n'a été menée jusqu'à maintenant.

Nous savons que le bruit peut avoir sur les personnes un effet de stress physiologique, « induisant une réaction végétative (comme l'élévation de la pression sanguine), provoquant des réactions somatiques (comme l'hypertension) et psychosomatiques qui, à leur tour, peuvent influencer le risque de contracter une maladie » [traduction] (van Kempen et Babisch, 2012). La preuve établie par les études sur le bruit de la circulation routière montre toutefois qu'il n'y aurait pas de risque accru de contracter une maladie cardiovasculaire associée à l'exposition à des niveaux de pression acoustique inférieurs à 60 dB(A) le jour (Babisch, 2008) ou à 55 dB(A) la nuit (Babisch, 2011).

Les recherches sur d'autres types de bruit ambiant ont montré que des maladies cardiovasculaires pouvaient être indirectement liées à une exposition au bruit par l'intermédiaire d'un dérangement et d'un stress chroniques. Par exemple, le dérangement chronique a été utilisé comme indicateur d'un risque accru de déséquilibre persistent du système de stress physiologique (Barregard *et al.*, 2009; Pedersen, 2011). Ce déséquilibre peut entraîner une élévation de la pression sanguine et d'autres manifestations de maladie cardiovasculaire si l'exposition se prolonge (Barregard *et al.*, 2009). La voie par laquelle le bruit influence la pression sanguine n'est toujours pas bien comprise. Stansfeld (2003) a soutenu que l'effet pouvait être médié par une réponse intermédiaire

comme le dérangement causé par le bruit; toutefois, les données actuelles sont insuffisantes pour confirmer cette thèse. Willich *et al.* (2006) ont trouvé une association « entre les nuisances acoustiques chroniques et le risque d'infarctus du myocarde » [traduction]. Ils ont noté que cette constatation était conforme à un mécanisme causal basé sur un modèle de stress conceptuel en vertu duquel « des niveaux de pression acoustique ou le dérangement par le bruit peuvent accroître le stress psychologique » [traduction]. Suls (2013) a examiné les preuves relatives à une association entre le dérangement et la colère ou l'hostilité, qui sont des facteurs de stress établis.

De plus, il existe des données démontrant que la perturbation du sommeil causée par le bruit de la circulation routière peut entraîner des effets cardiovasculaires. Par exemple, une expérience en laboratoire (nombre de participants = 38) simulant l'exposition à un bruit de train de marchandises (à 40 dB(A) et 50 dB(A)) a démontré que le bruit du transport ferroviaire nocturne avait un effet sur le système cardiovasculaire des sujets endormis (Tassi *et al.*, 2010; Croy *et al.*, 2013).

Pedersen (2011) n'a trouvé aucun lien statistiquement significatif entre l'exposition au bruit des éoliennes ou un dérangement et une pression sanguine élevée autodéclarée ou une maladie cardiovasculaire autodéclarée dans aucune des trois études dont elle a repris l'analyse. Utilisant les deux études suédoises (SWE-00, SWE-05), Pederson et Persson Waye (2008) ont examiné le lien entre le dérangement causé par le bruit des éoliennes et les maladies cardiovasculaires. Selon leurs constats, il n'y aurait pas de différence entre les taux de maladies cardiovasculaires signalées par les répondants ayant indiqué qu'ils étaient dérangés par le bruit des éoliennes et ceux des autres répondants (Pedersen et Persson Waye, 2008). Les échantillons utilisés dans les études analysées par Pedersen (2011) et Pedersen et Waye (2008) sont relativement petits, compte tenu de la nécessité d'examiner des augmentations du risque relatif, qui devraient normalement être mineures, ainsi que des erreurs importantes de classement et d'autres sources de biais.

Les effets cardiovasculaires de diverses sources de bruit, comme la circulation routière, le bruit ambiant dans la collectivité et le bruit en milieu de travail, ont fait l'objet de nombreuses recherches (Babisch, 2008; van Kempen et Babisch, 2012). Une méta-analyse de 43 études épidémiologiques publiées de 1970 et 1999 réalisée pour examiner le lien entre l'exposition au bruit et la pression sanguine ou les cardiopathies ischémiques a relevé des augmentations faibles de la pression sanguine résultant de l'exposition au bruit en milieu de travail (van Kempen *et al.*, 2002). Cet examen a aussi démontré un lien significatif entre l'exposition à du bruit en milieu de travail ou à du bruit causé

par la circulation aéroportuaire à des niveaux de 45 à 75 dB(A) $L_{Aeq,16h}$) et l'hypertension (van Kempen *et al.*, 2002). Une autre méta-analyse des effets du bruit de la circulation routière sur le dérangement et la santé a montré l'existence d'une « relation positive et significative entre le bruit causé par le dérangement et le risque d'hypertension artérielle » [traduction] (Ndrepepa et Twardella, 2011).

Des études menées par Bakker (2012) et Shepherd *et al.* (2011) indiquent que le dérangement agirait comme un médiateur ou une voie dans une chaîne de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et les effets sur la santé ou la qualité de vie. Cette conclusion est étayée par le constat suivant lequel le dérangement serait un facteur modificateur important au regard de l'association entre le bruit de la circulation aérienne et l'hypertension (Babisch *et al.*, 2003). On a établi que le niveau de pression acoustique et le dérangement causé par le bruit sont de bons indicateurs de l'effet du bruit de la circulation aérienne sur la santé. Une autre étude a montré que le niveau de pression acoustique et le dérangement causé par le bruit constituaient tous deux des variables explicatives du lien entre l'exposition chronique au bruit et les maladies cardiovasculaires, bien que le niveau de pression acoustique soit souvent un meilleur indicateur (Babisch *et al.*, 2013). Le dérangement et la perturbation découlant de l'exposition au bruit de la circulation routière ont aussi été associés à une plus forte incidence de cardiopathie ischémique; toutefois, l'exposition au bruit n'avait aucune incidence sur le risque de cardiopathie ischémique associé aux sujets de l'étude qui avaient déjà des états de santé les prédisposant à contracter une maladie cardiovasculaire (Babisch *et al.*, 2003).

L'exposition chronique au bruit ambiant en général a été associée à un risque plus élevé d'infarctus du myocarde, ce qui concorderait avec l'hypothèse qu'il y aurait une association entre l'exposition à long terme au bruit et le risque de contracter une maladie cardiovasculaire. Willich *et al.* (2006) ont soutenu que l'exposition chronique au bruit serait « l'équivalent d'un facteur de risque exogène contribuant à l'émergence d'une maladie cardiovasculaire » [traduction].

Bien que les sons de basse fréquence constituent une composante fréquente du bruit des éoliennes, on en connaît peu sur leurs effets spécifiques sur les maladies cardiovasculaires, particulièrement en comparaison avec d'autres types de bruits aux caractéristiques complexes et difficiles à mesurer, tels que les bruits impulsifs (par exemple, les explosions et les coups de feu) (Berglund *et al.*, 1996). Schust (2004) a fait état d'une étude de Danielsson et Landstrom (1985) qui démontrait les effets des infrasons de diverses fréquences (6, 12 ou 16 Hz) et de divers niveaux de pression acoustique (95, 110 ou 125 dB(Z)) sur la pression sanguine, la fréquence cardiaque et les taux de cortisol sérique.

L'étude montrait un lien entre les infrasons et l'induction d'une vasoconstriction périphérique accompagnée d'une augmentation de la pression sanguine et a conclu que « les infrasons ambiants pouvaient jouer un rôle important dans l'apparition de l'hypertension artérielle essentielle chez les personnes prédisposées » [traduction] (Danielsson et Landstrom, 1985). Les niveaux d'exposition étaient cependant beaucoup plus intenses que ceux qui sont observés par rapport au bruit des éoliennes. Un groupe de recherche portugais a soutenu que les infrasons et les sons de basse fréquence produits par les éoliennes pouvaient causer une « maladie vibroacoustique », un syndrome hypothétique comprenant des effets cardiovasculaires tels qu'un risque accru de chirurgie des artères coronariennes, laquelle peut être associée à une exposition à long terme à des sons à des niveaux de pression acoustique élevés et à composantes de basse fréquence (Alves-Pereira et Branco, 2007). Jusqu'à maintenant, les recherches indépendantes n'ont pas corroboré l'existence d'une « maladie vibroacoustique » (Kåsin *et al.*, 2012). De plus, il n'y a pas de preuves que les éoliennes émettent des infrasons ou des sons de basse fréquence à des niveaux de pression qui seraient comparables à ceux qui ont été étudiés en lien avec la « maladie vibroacoustique » (Bolin *et al.*, 2011).

6.4.1 Résumé de la preuve relative aux maladies cardiovasculaires

Le comité d'experts n'a pas trouvé de données prouvant l'existence indiquant un lien direct entre une exposition au bruit des éoliennes et l'apparition de maladies cardiovasculaires. Plusieurs des études examinées reposaient sur des définitions de cas de maladies cardiovasculaires spécifiques liées aux données autodéclarées, mais aucune de ces études n'a montré une association statistiquement significative. Par conséquent, le comité d'experts a déterminé que les données disponibles étaient ***insuffisantes*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence d'un lien causal. Des recherches antérieures sur d'autres sources de bruit ambiant avaient révélé de manière répétée des associations entre l'exposition au bruit et des effets cardiovasculaires, mais pour des niveaux d'exposition beaucoup plus élevés que ceux qui sont associés au bruit des éoliennes.

6.5 DIABÈTE

Le diabète est une maladie chronique qui se manifeste lorsque le corps est incapable de produire suffisamment d'insuline (diabète de type 1) ou de l'utiliser adéquatement (diabète de type 2). L'insuline est une hormone qui régule la quantité de glucose présente dans le sang. Le diabète de type 1 se manifeste dès la jeune enfance ou à l'adolescence et est généralement considéré comme le résultat d'une prédisposition génétique héréditaire. Le diabète de type 2 apparaît principalement chez les adultes et est associé à un certain nombre de facteurs de risque, y compris le stress, les perturbations du sommeil, un poids corporel élevé et l'inactivité physique (Sørensen *et al.*, 2012; OMS, 2014).

Des chercheurs ont tenté de vérifier si l'exposition au bruit de la circulation routière pouvait être associée à un risque plus élevé d'apparition du diabète de type 2. Comme pour les recherches sur les maladies cardiovasculaires, les recherches sur le diabète sont difficiles en raison de la multitude de facteurs de risques associés à cette maladie. Par ailleurs, le diabète ne se manifeste qu'après une exposition à long terme à ces facteurs de risque.

Aucune des études examinées par le comité d'experts ne portait sur le diabète sucré; cependant, les trois études analysées dans Pedersen (2011) ont effectivement fait état de cas autodéclarés de diabète parmi les populations étudiées. Une étude (SWE-05) a montré une association statistiquement significative entre des niveaux de pression acoustique pondérés A captés aux résidences des participants et des cas de diabète. L'étude ne tenait pas compte de la durée d'exposition, toutefois, et n'était pas conçue pour neutraliser les facteurs de confusion propres au diabète, comme le taux de diabète préexistant ou de type 1, le régime alimentaire, l'activité physique, le tabagisme actuel et passé, la charge de travail ou l'état de santé en général.

Deux études récentes ont vérifié si le bruit de la circulation routière ou l'exposition à long terme au bruit du transport aérien influençait l'incidence du diabète de type 2 chez les résidents exposés. Sørensen *et al.* (2012) ont utilisé les données d'une étude de cohorte sur l'exposition au bruit de la circulation routière où 57 053 sujets avaient été suivis sur une période moyenne de 9,6 années. Au cours de la période de surveillance, 2 752 cas de diabète avaient été recensés. L'étude a montré qu'une exposition moyenne plus élevée de 10 dB au moment du diagnostic était associée à un risque plus élevé de diabète à un ratio de taux d'incidence (RTI) de 1,11[7] (1,03 à 1,19 à un intervalle de confiance (IC) de 95 %), alors que l'exposition au cours des cinq années précédant un diagnostic était associée à un RTI de 1,14 (1,06 à 1,22 à un IC de 95 %) après ajustement pour les facteurs de confusion. Eriksson *et al.* (2014) ont vérifié les « effets d'une exposition à long terme au bruit du transport aérien sur l'indice de masse corporelle (IMC), le tour de taille et le diabète de type 2 d'après les données d'une étude de cohorte menée auprès de 5 156 participants. Les résultats n'ont pas montré l'existence d'une association statistiquement significative entre l'exposition au bruit (basée sur une variable de bruit à échelle ordinale) et l'IMC ou le diabète de type 2 [traduction] ». Une augmentation de 5 dB du niveau de bruit du transport aérien était associée à une augmentation supérieure à la moyenne du tour de taille de 1,51 cm (1,13 à 1,89 à un IC de 95 %).

7 Cela signifie qu'à tous les 100 cas prévus au sein de la population générale (non exposée), d'après le taux moyen de cas de diabète de type 2, 111 cas ont été effectivement observés au sein du groupe exposé.

Les deux études utilisaient des échelles d'évaluation de l'exposition qui considéraient que les résidents n'étaient pas exposés si L_{den} était inférieur à 50 dB(A), dans le cas de la circulation routière, et inférieur à 42 dB(A), dans celui de la circulation aérienne. Les associations les plus étroites sont apparues à des niveaux de pression acoustique supérieurs à 60 dB (circulation routière) et supérieurs à 55 dB (circulation aérienne). Ces niveaux d'exposition sont généralement plus élevés que ceux qui ont été mesurés pour les participants aux études sur les éoliennes (voir le chapitre 3).

6.5.1 Résumé de la preuve sur le diabète

Le comité d'experts n'a trouvé qu'une étude ayant montré un lien entre le bruit des éoliennes et des cas de diabète; cependant, la conception de cette étude ne précisait pas la période au cours de laquelle ces cas s'étaient manifestés ou si des facteurs de confusion pouvaient avoir influencé les résultats. Par conséquent, le comité d'experts a déterminé que les données disponibles étaient ***insuffisantes*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence de lien causal. Des études ont établi que le diabète pourrait être lié à d'autres sources de bruit ambiant; cependant, des lacunes dans les connaissances persistent concernant les niveaux et la durée d'exposition qui sont nécessaires pour accroître l'incidence du diabète de type 2. En ce qui a trait au bruit des éoliennes, en général les connaissances sont insuffisantes concernant les effets d'une exposition à long terme. Cela est partiellement dû au fait que le bruit des éoliennes est un phénomène passablement récent.

6.6 EFFETS SUR L'AUDITION

La perte auditive induite par le bruit est une inaptitude partielle ou totale à percevoir des sons résultant d'atteintes neurosensorielles de l'oreille interne (par exemple des cellules ciliées) ou du nerf auditif. Ces atteintes conduisent à une élévation des seuils de détection des sons ou à une surdité permanente et irréversible. L'exposition à des sons de niveau de pression acoustique élevé peut à court terme causer un « décalage temporaire du seuil d'audition » (Nelson *et al.*, 2005). Cependant, la perte auditive permanente induite par le bruit est fréquente, par exemple, chez ceux qui s'exposent à long terme, dans le cadre de leur travail, à du bruit à large bande émis à des niveaux de pression acoustique dépassant les 80 à 85 dB(A) qui endommagent les cellules ciliées externes.

Aucune étude ou expérience n'a été réalisée à ce jour pour vérifier spécifiquement si l'exposition au bruit des éoliennes pouvait entraîner une perte auditive. Une perte auditive induite par le bruit survient habituellement à des niveaux d'exposition supérieurs à ceux qui sont observés à proximité des éoliennes.

L'exposition à un bruit ambiant de 75 dB(A) ou moins ne devrait pas causer de perte auditive, même pour une exposition sur une durée de vie entière (OMS, 2011).

6.6.1 Résumé de la preuve relative à la perte auditive

Les recherches sur la perte auditive induite par le bruit fournissent des ***preuves d'une absence de lien causal*** entre l'exposition à des bruits à large bande aux niveaux de pression acoustique associés aux éoliennes, quels que soient l'éloignement ou la perte auditive. Les études sur d'autres sources de bruit concordent en ce qu'elles ne démontrent pas de relation positive entre l'exposition humaine à des sons aux niveaux de pression acoustique associés aux éoliennes et des symptômes de perte auditive.

6.7 ACOUPHÈNES

Acouphène est le « terme général désignant une perception de son (par exemple, un bourdonnement, un sifflement ou un tintement) qui ne peut être attribuée à aucune source externe » [traduction] (OMS, 2011). Des recherches ont recensé un large éventail de causes possibles des acouphènes, dont les pertes auditives induites par le bruit, les troubles neurologiques, le stress, les troubles métaboliques et les troubles psychiatriques. Les mécanismes spécifiques qui peuvent causer l'apparition d'acouphènes ne sont pas encore bien compris, malgré la prévalence relativement élevée de cet état au sein de nombreuses populations (Henry *et al.*, 2005).

Une des trois études analysées par Pedersen (2011) a montré une association statistiquement significative entre l'exposition au bruit des éoliennes et des cas autodéclarés d'acouphène (SWE-00). Aucun lien n'a été trouvé avec un dérangement découlant de l'exposition au bruit des éoliennes en plein air ou à l'intérieur. Dans des recherches publiées sur d'autres sources de bruit ambiant, approximativement 10 % des patients souffrant d'acouphène recensés dans la base de données de l'Oregon Tinnitus Clinic avaient eux-mêmes attribué la cause de leur acouphène à des bruits de longue durée (Henry *et al.*, 2005). L'OMS (2011) a soutenu qu'à l'échelle mondiale, 3 % de la population pourrait souffrir d'acouphène attribuable à une exposition au bruit ambiant. Les acouphènes sont également associés à une perte auditive. Dans une étude réalisée en Grande-Bretagne, 16,1 % des hommes ayant déclaré avoir des problèmes auditifs graves avaient aussi déclaré avoir un acouphène, comparativement à 5 % de ceux qui n'avaient déclaré aucun problème auditif ou seulement des problèmes mineurs. Chez les femmes, ces chiffres étaient respectivement de 33,1 % et 2,6 % (Palmer *et al.*, 2002). Dans une revue de la littérature, Henry *et al.* (2005) ont montré que la majorité des patients souffrant d'acouphène sont également atteints à un certain degré de perte auditive, à des taux variant de 50

à 80 % selon la conception de l'étude et l'âge des sujets étudiés. En revanche, l'acouphène est également fréquent chez les personnes qui ne souffrent pas d'une perte auditive mesurable (Eggermont, 2005).

La plupart des études sur les acouphènes induits par le bruit portent principalement sur les bruits impulsifs (par exemple, les explosions ou les coups de feu) ou sur l'exposition à court terme à des bruits intenses (par exemple, à de la musique bruyante, à des bruits en milieu de travail), qui se produisent à des niveaux de pression acoustique beaucoup plus élevés que le bruit des éoliennes. Le comité d'experts n'a trouvé aucune étude montrant une association entre les acouphènes et les sons de basse fréquence ou les infrasons.

6.7.1 Résumé de la preuve sur l'acouphène

Le comité d'experts a déterminé que les données probantes actuelles étaient ***insuffisantes*** pour parvenir à une conclusion sur une présence ou une absence de lien causal entre le bruit des éoliennes et les acouphènes. Le comité a relevé une incertitude considérable relative aux causes générales des acouphènes ainsi que des lacunes de connaissance concernant les corrélations possibles entre une exposition à long terme au bruit ambiant et les acouphènes.

6.8 EFFETS DES SONS INAUDIBLES SUR L'OREILLE INTERNE

Plusieurs rapports ont montré que certains symptômes, tels que le vertige, la nausée, la pression dans l'oreille ou des problèmes de vision, pouvaient être attribuables aux sons inaudibles émis par les éoliennes, tels que des infrasons et des sons de basse fréquence en deçà du seuil d'audition d'une personne (Pierpont, 2006, 2009; Jeffery *et al.*, 2013; Ambrose *et al.*, 2012).

Le comité d'experts n'a trouvé aucune donnée probante dans les études épidémiologiques ou les expériences menées spécifiquement pour vérifier les incidences sur l'oreille des sons inaudibles émis par les éoliennes. Toutefois, des recherches ont exploré des mécanismes possibles par lesquels les infrasons et les sons de basse fréquence pourraient porter atteinte à l'oreille, notamment en causant des dommages à l'oreille interne, en stimulant la cochlée ou en stimulant le système vestibulaire.

Stimulation de la cochlée

Les cellules ciliées de la cochlée sont le principal organe de la perception des sons chez l'humain. Les ondes sonores stimulent les cellules ciliées internes, qui transforment le son en un signal nerveux qui est perçu par le cerveau comme un son. Les cellules ciliées internes sont moins sensibles aux infrasons (≤ 20 Hz) ou aux basses fréquences et des niveaux de pression acoustique relativement

élevés sont nécessaires pour provoquer une sensation, particulièrement pour la bande des infrasons (voir le chapitre 4); toutefois, il n'est pas certain si d'autres voies de stimulation existent.

Par le biais d'une surveillance de la cochlée, Hensel *et al.* (2007) ont montré que le fonctionnement de la cochlée était altéré après une exposition à des infrasons d'une fréquence de 6 Hz et d'un niveau de pression acoustique de 130 dB. D'après ce constat et d'autres recherches, Salt et Hullar (2010) ont soutenu que les sons de basse fréquence pouvaient stimuler les cellules ciliées externes à des niveaux de pression acoustique de 40 dB en deçà du seuil d'audition lorsque les cellules ciliées internes ne sont pas stimulées. L'étude a montré que les potentiels cochléaires générés par la transduction des cellules ciliées chez les cochons d'Inde pouvaient être enregistrés en réponse à des infrasons de 5 Hz, bien que ces potentiels ne soient pas perçus par le cerveau comme des sons parce qu'ils sont transmis par le biais de voies nerveuses différentes. Dans une étude subséquente réalisée sur des animaux, Salt *et al.* (2013) ont montré que les infrasons de 5 Hz pouvaient provoquer une réponse électrique cochléaire plus importante que celle qui serait provoquée par des sons d'une fréquence de 50 à 1 000 Hz à des niveaux aussi faibles que 60 à 65 dB. D'après ces résultats, les auteurs ont soutenu que la région apicale (extrémité) des cellules ciliées était plus sensible qu'on ne l'avait précédemment estimé et qu'elle pouvait constituer un mécanisme par lequel les infrasons stimulent le cerceau sans que des sons soient entendus. Ils ont également soutenu que « certains états cliniques, tels que la maladie de Ménière, la déhiscence du canal supérieur ou des cas asymptomatiques d'hydropisie endolymphatique » pouvaient accroître encore davantage cette sensibilité (Salt et Hullar, 2010). Cela impliquerait que certaines personnes sont hypersensibles aux infrasons. Dans un article antérieur, Salt et Kaltenbach (2011) ont aussi avancé l'hypothèse que les infrasons pourraient engendrer des sensations de plénitude, de pression dans l'oreille ou d'acouphènes. Selon cette étude, la cochlée pourrait répondre à des infrasons à des niveaux supraliminaires, mais l'effet sur le cerveau demeure inconnu (voir Ellenbogen *et al.*, 2012).

Stimulation du système vestibulaire

Le système vestibulaire est l'organe qui permet aux gens de maintenir leur équilibre, leur orientation spatiale et leur fixation visuelle (voir le chapitre 4). Aucune étude épidémiologique ou expérience vérifiant l'activation du système vestibulaire humain par des sons inaudibles transmis par *conduction aérienne* n'a été trouvée. La preuve se limite actuellement aux études sur des sujets humains portant sur la stimulation acoustique transmise par *conduction osseuse* et aux études réalisées sur des animaux exposés à des sons de basse fréquence transmis par conduction aérienne.

Dans une expérience réalisée avec des souris, Tamura *et al.* (2012) ont montré que les sons de basse fréquence de 100 Hz à 70 dB causaient une altération de l'équilibre en raison d'une perte partielle de cellules ciliées et de niveaux accrus de stress oxydatif dans le vestibule. Les auteurs ont noté qu'il y avait « incertitude à savoir si ce niveau d'exposition sonore pouvait directement causer une perte de cellules ciliées », mais que les constats « indiquaient que des études plus approfondies seraient nécessaires, notamment une extrapolation aux humains ». Dans les études chez les humains, Todd *et al.* (2008) ont montré que les signaux acoustiques transmis par conduction osseuse pouvaient activer les organes otolithes de l'oreille interne. Le seuil de déclenchement du réflexe vestibulo-oculaire, où le mouvement de la tête est compensé par un changement de la position des yeux, était le plus bas à une fréquence de 100 Hz. La stimulation acoustique est une technique bien établie pour tester le fonctionnement du système vestibulaire (potentiel évoqué vestibulaire myogénique (VEMP)) (par exemple, Colebatch et Halmagyi, 1992; Colebatch *et al.*, 1994; Robertson et Ireland, 1995; Curthoys *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2012).

Ces études indiquent que les sons transmis par conduction aérienne à des niveaux de pression acoustique inférieurs à 100 dB ne seraient pas susceptibles de stimuler les otolithes (la partie la plus sensible des organes sensoriels vestibulaires) chez une personne en bonne santé. Des éléments de preuve tendent toutefois à démontrer que dans certains états pathologiques, les signaux acoustiques pourraient activer le système vestibulaire à des niveaux moins élevés. Le syndrome de Tullio (Tullio, 1929), caractérisé par un vertige ou un réflexe vestibulo-oculaire anormal, résulte de changements dans les voies de transmission des fluides entre les zones cochléaire et vestibulaire de l'oreille interne causés par diverses anomalies anatomiques (par exemple, une dilatation de l'aqueduc du vestibule ou une fistule périlymphatique). Le syndrome de *déhiscence du canal* (semi-circulaire) *supérieur* (SDCS) (Minor *et al.*, 1998; Minor, 2000) est une fenêtre (ouverture) pouvant être observée dans un canal semi-circulaire, corrélée avec une activité vestibulaire induite (voir le chapitre 4). Lorsque ces états pathologiques sont présents, les signaux acoustiques peuvent activer le système vestibulaire de manière plus efficace. Un certain nombre d'études ont utilisé des examens des potentiels évoqués otolithiques (VEMP, pour Vestibular Evoked Myogenic Potential) pour comparer la sensibilité du système vestibulaire aux sons chez les patients atteints à divers degrés de déhiscence du canal supérieur (Pfammatter *et al.*, 2010) ou chez les patients avant et après une chirurgie réalisée pour colmater la déhiscence du canal supérieur (Welgampola *et al.*, 2008). Ces études ont fait état d'une diminution de 20 à 30 dB du seuil de stimulation sonore chez les patients atteints du SDCS. Russo (2014) a estimé que le SDCS pourrait toucher jusqu'à 5 % de la population. D'autres études ont montré que 1,2 % des adultes normaux

présentaient définitivement ou possiblement une déhiscence (Erdogan *et al.*, 2011). Hagiwara *et al.* (2012) ont fait état d'une prévalence de 3 % chez les adultes et de 27 % chez les enfants de moins de deux ans.

Un nombre relativement important d'adultes et davantage d'enfants sont plus sensibles à l'activation acoustique du système vestibulaire que la population générale (Hagiwara *et al.*, 2012). Mais même chez ces personnes, de l'avis du comité d'experts, il est improbable que le système vestibulaire soit stimulé par les signaux acoustiques émis par les éoliennes. Le seuil normal d'activation sonore du système vestibulaire, d'après le test VEMP, est un niveau de pression acoustique approximatif de 110 dB. Les sujets ayant un état préexistant comme une déhiscence d'un canal pourraient être sensibles à des niveaux allant de 85 à 90 dB. Toutefois, aux niveaux de bruit maximaux de 40 à 50 dB(A) imposés par les règlements communément adoptés pour limiter l'exposition au bruit des éoliennes, les composantes à large bande du bruit des éoliennes ne s'approchent pas suffisamment des niveaux nécessaires pour activer le système vestibulaire (Harrison, 2014). Si l'importance réduite des composantes de basse fréquence en raison de l'utilisation de niveaux sonores pondérés A est prise en compte et que les niveaux des signaux de basse fréquence sont estimés d'après les données spectrales, les pointes dans les niveaux des sons de basse fréquence dépassent rarement les 70 dB. Par conséquent, d'après les données disponibles, le comité d'experts n'a pu conclure si des symptômes vestibulaires comme le vertige, les étourdissements ou la nausée pouvaient être directement liés à une exposition au bruit des éoliennes (Harrison, 2014).

6.8.1 Résumé de la preuve sur les effets des sons inaudibles

D'après les preuves exposées ci-dessus, le comité d'experts a fait les constats suivants :

- Les infrasons (5 Hz) peuvent stimuler les cellules ciliées externes de la cochlée à des niveaux de pression acoustique modérés (> 60 dB) dans certains modèles animaux; toutefois, l'effet sur le cerveau demeure inconnu et cette recherche n'a pas été extrapolée aux humains.
- Les infrasons peuvent stimuler le système vestibulaire humain à des niveaux de pression acoustique élevés (> 110 dB pour une personne de sensibilité normale et possiblement > 85 dB pour une personne de sensibilité plus élevée).
- Les seuils pour les infrasons et les sons de basse fréquence associés à une atteinte à l'oreille interne et à l'activation vestibulaire sont considérablement plus élevés que les niveaux d'exposition associés aux éoliennes. Le seuil d'activation de la cochlée dans les modèles animaux pourrait être atteint par le bruit des éoliennes, mais puisque ni le seuil chez les humains ni l'effet sur le cerveau ne sont connus, il n'est pas possible d'associer pour le moment l'activation de la cochlée par des infrasons à des effets sur la santé.

- Il est plausible que certains états cliniques pré-existants puissent abaisser le seuil de stimulation du système cochléaire ou vestibulaire et donc entraîner des sensibilités plus élevées aux sons inaudibles chez les personnes atteintes, en particulier chez les jeunes enfants; toutefois, aucun seuil spécifique n'a été établi jusqu'à maintenant. Il est donc encore incertain si le bruit des éoliennes peut dépasser de tels seuils.

Compte tenu de ces constats, le comité d'experts a déterminé que les preuves actuelles sont ***insuffisantes*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence de liens de causalité entre l'exposition aux sons inaudibles émis par les éoliennes et des symptômes comme le vertige, la nausée, la pression dans l'oreille ou des troubles de la vision. Les lacunes dans les connaissances touchent entre autres la mesure et la compréhension des sons de basse fréquence produits par les éoliennes, les seuils de stimulation ou d'endommagement de la cochlée et des systèmes vestibulaires chez les humains et les seuils moins élevés chez les populations sensibles.

6.9 PERFORMANCE COGNITIVE ET MENTALE

Les aptitudes cognitives se développent à un jeune âge (Diamond, 2002). Stansfeld *et al.* (2005) ont émis l'hypothèse que le bruit ambiant pouvait altérer la performance mentale des jeunes enfants. En outre, le bruit ambiant pourrait fausser la reconnaissance des sons du langage (Bryant et Bradley, 1985). Plusieurs études initiales réalisées par Hockey et ses collègues ont relevé d'autres voies potentielles par lesquelles l'exposition au bruit pourrait influer sur la performance cognitive des adultes (Hockey, 1984; Robert et Hockey, 1997). Ces études indiquaient que le bruit pourrait avoir des effets sur l'exécution de tâches particulières et que, bien qu'il augmente le niveau de vigilance, le bruit n'augmente pas la vitesse d'exécution mentale, mais réduit plutôt la précision des facultés cognitives et l'efficacité de la mémoire à court terme.

Le comité d'experts n'a pas trouvé d'études épidémiologiques traitant des effets du bruit des éoliennes sur la performance cognitive. Les preuves se limitent actuellement à deux études réalisées en laboratoire. Ruotolo *et al.* (2012) ont montré que le contrôle exécutif et la mémoire sémantique se dégradaient sous l'effet de stimuli auditifs et visuels qui simulaient une proximité croissante avec un parc éolien. Les éléments visibles semblaient amplifier l'effet négatif sur le contrôle exécutif. Aucun effet sur la mémoire verbale à court terme n'a été relevé. Ces résultats indiquent que les éoliennes pourraient avoir des effets sélectifs sur la performance cognitive, les plus importants touchant les tâches qui exigent des niveaux élevés de contrôle exécutif.

Alimohammadi *et al.* (2013) ont réalisé une expérience pour vérifier si les bruits de basse fréquence produits par différentes sources, y compris les éoliennes, causent un dérangement ou ont un effet sur la performance mentale et si les effets dépendent de la personnalité de chaque personne. La performance mentale des participants exposés à des bruits de basse fréquence augmentait autant en vitesse qu'en précision lors de la réalisation d'épreuves conçues pour évaluer le contrôle exécutif. Les résultats ont aussi révélé que les participants introvertis étaient considérablement plus dérangés et qu'ils étaient moins précis dans la réalisation des épreuves que les participants extrovertis. Ces résultats contredisent les recherches basées sur les sons de haute fréquence provenant d'appareils de ventilation, qui indiquaient que les bruits à des niveaux supérieurs à 51 dB(A) perturbaient la performance (Kjiellberg et Wide, 1988). Toutefois, la littérature sur la performance cognitive est très complexe et les divergences dans les résultats indiquent que l'effet du bruit sur la performance cognitive dépend probablement du type de tâche que doivent accomplir les sujets.

Des études antérieures sur le bruit ambiant ont montré qu'il pouvait avoir un effet sur la performance cognitive et l'apprentissage, particulièrement chez les enfants (Clark et Sörqvist, 2012; Klatte *et al.*, 2013). Par exemple, Hughes et Jones (2001) ont présenté une revue des études réalisées en laboratoire montrant que le son avait un effet sur le traitement cognitif et qu'il perturbait la performance. Plusieurs études ont montré que les habiletés cognitives des enfants exposés à du bruit à l'école étaient diminuées (Clark et Stansfeld, 2007). Les tâches touchées faisaient appel au traitement central et au langage, soit la compréhension de texte, la mémoire et l'attention (Evans et Maxwell, 1997; Haines *et al.*, 2001). Plusieurs études importantes ont été réalisées concernant les effets sur la cognition des enfants de la relocalisation d'un aéroport à Munich, en Allemagne (Evans *et al.*, 1995, 1998). Une exposition élevée au bruit avait été associée à des déficits de la mémoire et de la compréhension de texte, mais une fois l'exposition au bruit terminée, les déficits disparaissaient, indiquant que les effets pourraient être réversibles.

Une étude de grande envergure menée aux Pays-Bas, en Espagne et au Royaume-Uni par Stansfeld *et al.* (2005) a montré un lien exposition-effet linéaire entre l'exposition chronique au bruit de la circulation aérienne et des troubles de compréhension de texte et de la mémoire de reconnaissance; les chercheurs ont déterminé que le bruit de la circulation aérienne constituait un stresseur auditif qui portait atteinte à la qualité de l'environnement éducatif.

6.9.1 Résumé de la preuve sur la performance cognitive et mentale

Le comité n'a trouvé aucune étude de population et très peu de preuves expérimentales sur l'effet spécifique du bruit des éoliennes sur la performance cognitive. Des recherches sur d'autres sources de bruit ambiant ont relevé un possible lien; toutefois, les résultats ne sont pas concluants, montrant à la fois des effets bénéfiques et néfastes sur la performance cognitive et mentale. Par conséquent, le comité d'experts a déterminé que la preuve était ***insuffisante*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence d'un lien de causalité entre le bruit des éoliennes et la performance cognitive et mentale. Les lacunes à combler dans les connaissances concernent la clarté des définitions de cas et des mesures de la performance mentale en situation d'exposition au bruit; la compréhension des mécanismes en vertu desquels les caractéristiques sonores peuvent stimuler ou altérer la performance cognitive; et la compréhension de la façon dont ces effets sont influencés par les caractéristiques des sujets exposés et le type de tâche cognitive accomplie.

6.10 SANTÉ PSYCHOLOGIQUE

La santé mentale est « un état de bien-être émotionnel et psychologique » (Van Kamp et Davies, 2008). Conformément à la définition de la santé utilisée dans le présent rapport, la santé mentale désigne l'absence de maladie mentale ainsi que de sentiments ou d'émotions désagréables (détresse psychologique) pouvant altérer le niveau de fonctionnement d'une personne. L'exposition au bruit ambiant a été liée à des effets sur la santé mentale dans diverses circonstances. Toutefois, dans la plupart des cas, on a établi que le bruit ambiant conduisait à une détresse psychologique plutôt que d'entraîner des maladies mentales graves (Van Kamp et Davies, 2008).

Concernant le bruit des éoliennes, une étude de Bakker *et al.* (2012) a trouvé une relation positive entre l'exposition et une détresse psychologique, le dérangement semblant agir comme une variable intermédiaire. L'étude a de plus démontré que la détresse psychologique était liée à la perturbation du sommeil, qu'il y ait ou non exposition au bruit des éoliennes.

Que l'exposition au bruit ambiant puisse conduire directement à une maladie mentale n'a toujours pas été établi de façon certaine. Dans une revue de la littérature, Stansfeld *et al.* (2000) ont trouvé que l'exposition au bruit ambiant ne semblait pas conduire à des troubles psychologiques diagnostiqués, mais qu'elle était parfois associée à des symptômes de santé mentale tels que la dépression et l'anxiété. Les auteurs ont de plus noté que la sensibilité autodéclarée au bruit ne semblait pas interagir avec l'exposition au bruit pour entraîner une maladie mentale. La sensibilité au bruit a été, toutefois, associée à certains symptômes de santé mentale. Dans la même veine, Stansfeld *et al.* (2009) ont noté que le

bruit lié au transport n'était pas susceptible de causer une maladie mentale grave, mais qu'il pouvait être responsable de symptômes psychologiques. Hardoy *et al.* (2005) ont établi un lien entre l'exposition au bruit de la circulation aérienne et un « trouble généralisé de l'anxiété » ou un « trouble de l'anxiété non autrement précisé ». Dans une étude sur le bruit de la circulation routière, Sygna *et al.* (2014) ont établi une corrélation positive entre l'exposition au bruit et une détresse psychologique chez les sujets ayant une qualité de sommeil inadéquate, mais la corrélation n'était pas statistiquement significative.

6.10.1 Résumé de la preuve sur la santé psychologique

Les données actuelles sur l'exposition au bruit et la santé mentale ne permettent pas de déterminer si le bruit peut causer une maladie mentale ou s'il ne fait que contribuer à la détresse psychologique ou exacerber les symptômes des personnes qui souffrent déjà d'une maladie mentale. Les preuves examinées par le comité d'experts ne permettent pas de conclure s'il existe un lien causal spécifique entre la détresse psychologique et l'exposition au bruit des éoliennes. Le comité a déterminé, par conséquent, que la preuve était actuellement ***insuffisante*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence d'un lien de causalité. Le comité d'experts a de plus noté que, compte tenu de la nature incertaine des effets du bruit sur la santé mentale générale, les lacunes dans les connaissances dans ce domaine ne sont pas propres au bruit des éoliennes. Une meilleure compréhension de l'effet d'une exposition au bruit en général sur les troubles psychologiques serait souhaitable et les effets des caractéristiques spécifiques du son des éoliennes demeurent encore plus incertains.

6.11 QUALITÉ DE VIE

Deux études ont examiné l'effet du bruit des éoliennes sur la qualité de vie liée à la santé. Shepherd *et al.* (2011) ont réalisé une étude transversale avec un groupe témoin en Nouvelle-Zélande en utilisant la version courte du sondage sur la qualité de vie de l'OMS. Les résultats concordaient avec les constats des études transversales sur une relation exposition-réponse entre le bruit des éoliennes et le dérangement et ont monté que plusieurs domaines de la qualité de vie étaient affectés négativement pour les répondants vivant à proximité d'éoliennes (perception de la qualité du sommeil, des niveaux d'énergie, de la qualité de vie environnementale et de l'agrément). Une étude de suivi réalisée sur une période de deux ans par McBride *et al.* (2013) a montré que la différence de qualité de vie entre les deux groupes demeurait stable au fil du temps. Mroczek *et al.* (2012) ont mené une étude transversale randomisée en utilisant le Questionnaire général sur la santé SF-36. Les résultats de cette étude n'ont pas montré de différence importante dans les aspects de la qualité de vie liés à la santé entre les résidents vivant plus près des éoliennes et les résidents vivant à une plus grande distance. Les auteurs ont noté, cependant, que la conception de l'étude ne tenait pas compte d'un certain nombre

de facteurs qui influencent la qualité de vie, tels que les possibilités économiques offertes par les éoliennes et les différences socioéconomiques entre les zones résidentielles examinées. De telles omissions peuvent conduire à des différences observées qui ne sont pas liées au bruit des éoliennes. Un sondage rempli par les intéressés, WindVOiCe, n'a pas montré que la qualité de vie des gens vivant plus près des éoliennes était altérée de manière importante (Krogh *et al.*, 2011).

6.11.1 Résumé de la preuve sur la qualité de vie

À ce jour, très peu de données sont disponibles sur l'effet spécifique du bruit des éoliennes sur la qualité de vie. En outre, les diverses études disponibles parviennent à des conclusions différentes. Le comité d'experts a déterminé, par conséquent, que la preuve était actuellement ***insuffisante*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence d'un lien de causalité.

6.12 AUTRES EFFETS SUR LA SANTÉ

Les précédentes sections de ce chapitre ont traité des effets sur la santé qui ont fait l'objet d'études de population ou d'expériences en laboratoire. Un certain nombre d'autres effets sur la santé ont été fréquemment attribués à l'exposition au bruit des éoliennes par le biais de séries de cas, de sondages informels, de plaintes, des médias et d'autres sources. Dans les recherches réalisées sur d'autres types de bruit ambiant, certains de ces effets ont été indirectement associés au bruit par l'intermédiaire d'un dérangement, mais non pas été directement associés à l'exposition au bruit des éoliennes. Ces effets comprennent le diabète (voir la section 6.5), les maladies chroniques (non précisées), une fatigue excessive et des céphalées. La fatigue et les céphalées sont des problèmes de santé très communs et non spécifiques, qui pourraient être des effets secondaires du dérangement, de la perturbation du sommeil ou du stress. Elles peuvent aussi être une conséquence de plusieurs autres facteurs et influences qui accompagnent l'exposition au bruit des éoliennes et sont par conséquent difficiles à isoler.

Pour tous les autres effets sur la santé considérés (voir le tableau 5.1), le comité d'experts n'a pas trouvé de recherches fondées sur des études de population ou des expériences qui pourraient fournir des preuves de la présence ou de l'absence de liens de causalité. Dans ces cas, le comité d'experts a par conséquent jugé qu'il ne pouvait pas appliquer le cadre du CIRC, étant donné que ces effets spécifiques sur la santé n'avaient pas encore fait l'objet de recherches empiriques primaires. Le comité a noté, cependant, que plusieurs de ces effets sur la santé pourraient être des conséquences d'autres effets qui ont été traités dans les recherches empiriques primaires liées aux éoliennes.

6.13 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Le comité d'experts a examiné les preuves choisies conformément au processus décrit au chapitre 5 et a fait état de tous les effets sur la santé pour lesquels au moins une étude de population a démontré un lien statistiquement significatif ou sur lesquels au moins une expérience de laboratoire avait été publiée. Les principaux effets sur la santé qui ont été relevés sont le dérangement, la perturbation du sommeil et le stress :

- Le comité a conclu que la preuve était ***suffisante*** pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et un dérangement.
- Le comité a conclu qu'il y avait des données ***limitées*** pour établir un lien causal entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil.
- La preuve actuelle est ***insuffisante*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence d'un lien de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et le stress, bien que le bruit puisse avoir un effet indirect, par l'intermédiaire du dérangement.
- Le comité conclut que ***les données indiquent qu'il n'y a pas de lien de causalité*** entre la perte auditive et l'exposition à des sons à large bande aux niveaux de pression acoustique associés aux éoliennes, quelle que soit la distance.

Le comité d'experts a déterminé que la preuve recueillie était ***insuffisante*** pour parvenir à une conclusion sur la présence ou l'absence de liens de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et d'autres problèmes de santé, énumérés au tableau 5.1. Un résumé descriptif plus détaillé est fourni au chapitre 7.

7

Résumé de la preuve, des lacunes dans les connaissances et des besoins de recherche

- Résumé de la preuve
- Qualité des preuves examinées
- Autres recherches nécessaires
- Résumé du chapitre

7 Résumé de la preuve, des lacunes dans les connaissances et des besoins de recherche

Principales constatations

- Une partie importante des preuves examinées par le comité d'experts comportait des limites méthodologiques : une neutralisation inadéquate des biais de sélection et des facteurs de confusion; la faible taille des échantillons limitant la puissance statistique; un manque d'études longitudinales; un manque de mesures pour évaluer l'exposition.
- Le comité d'experts a relevé des lacunes spécifiques dans les connaissances pour chacun des états de santé étudiés, notamment l'impact visuel des éoliennes sur le dérangement ou les possibles voies menant à la perturbation du sommeil ou au stress.
- Il y a une absence d'études longitudinales et un manque de recherches sur les populations sensibles.
- Pour mesurer le son des éoliennes, des niveaux pondérés A équivalents à long terme sont le plus souvent utilisés, mais ce type de mesure ne fait pas état des caractéristiques sonores des éoliennes telles que la modulation d'amplitude et les basses fréquences.

Le présent chapitre passe en revue les principales constatations liées au bruit des éoliennes et aux effets sur la santé et décrit les lacunes dans les connaissances qui doivent être comblées et les recherches qui devraient être menées pour mieux comprendre les effets néfastes sur la santé pertinents. Les constatations du comité d'experts au regard de chacun des effets néfastes sur la santé sont résumées dans les tableaux 7.1 et 7.2.

7.1 RÉSUMÉ DE LA PREUVE

Plus d'une voie ou d'un mécanisme pourrait lier de façon plausible l'exposition au bruit des éoliennes aux effets néfastes sur la santé examinés dans ce rapport. La figure 7.1 résume les voies de causalité les plus probables reliant l'exposition au bruit des éoliennes aux effets néfastes sur la santé. La preuve est suffisante pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et un dérangement. Toutefois, des lacunes dans les connaissances restent à combler pour pouvoir déterminer si des facteurs tels que les impacts visuels et les attitudes personnelles modifient la relation bruit-dérangement. Les recherches ont démontré que le dérangement à long terme résultant d'autres types de bruit, tels que le bruit de la circulation routière, peut être un précurseur ou un facteur contributif des effets néfastes sur la santé, y compris le stress, la perturbation

du sommeil et les maladies cardiovasculaires, mais les mécanismes exacts ne sont pas entièrement établis (Babisch, 2002, 2008; Persson Waye *et al.*, 2003; Barregard *et al.*, 2009; van Kempen et Babisch, 2012).

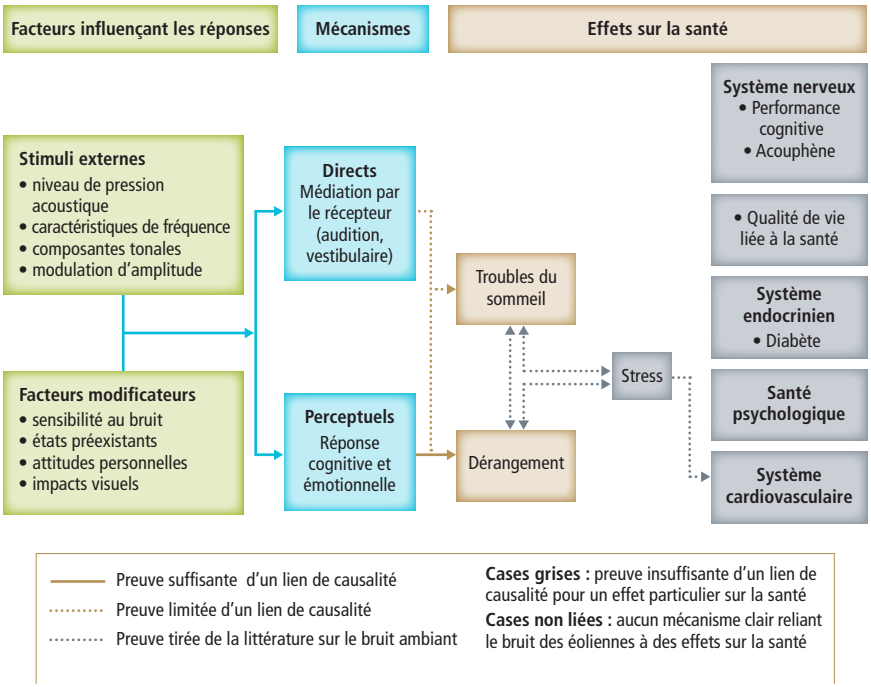


Figure 7.1

Résumé de l'information pertinente aux voies de causalité entre l'exposition au bruit des éoliennes et les effets indésirables sur la santé

Comme nous l'avons vu au chapitre 6, la preuve n'est suffisante que pour établir un lien causal avec le dérangement. La preuve actuelle est limitée en ce qui concerne un lien entre l'exposition au bruit des éoliennes et une perturbation du sommeil. La preuve est insuffisante par rapport au stress; toutefois les données en général indiquent que le stress pourrait être aggravé par le dérangement et la perturbation du sommeil. Les recherches sur les effets du bruit en général sur la santé indiquent aussi qu'un lien étroit pourrait exister entre le stress à long terme et des maladies cardiovasculaires ou autres. Néanmoins, les mécanismes de causalité demeurent incertains, particulièrement au regard du bruit des éoliennes. De multiples voies de transmission pourraient être responsables d'effets individuels et de taux d'effets sur la santé au sein de la population. L'absence d'un lien causal entre le bruit des éoliennes et une perte auditive n'est pas représentée dans cette figure. Voir le tableau 7.1 pour de plus amples informations.

De plus, le comité d'experts n'a pas trouvé de preuves que les éoliennes produisent régulièrement des infrasons à des niveaux considérablement plus élevés que d'autres sources de bruit ambiant, telles que le vent lui-même, ou aux

niveaux associés avec les effets sur la santé attribués aux infrasons. Toutefois, dans certains cas et pour certains types de résidences, les sons de basse fréquence peuvent être plus prononcés à l'intérieur parce que les basses fréquences sont moins atténuées par les murs et les fenêtres et en raison de la résonnance des structures. Le comité d'experts a aussi trouvé que l'exposition au bruit des éoliennes n'est pas susceptible de causer une perte auditive.

Les lacunes dans les connaissances à combler concernant les divers états ou symptômes abordés au chapitre 6 sont énumérées dans le tableau 7.1. Les effets sur la santé qui ne sont pas traités dans des études épidémiologiques ou des expériences propres aux éoliennes ou pour lesquels aucun mécanisme plausible n'a été proposé sont énumérés dans le tableau 7.2. Les travaux futurs pour évaluer de façon plus probante si ces effets sur la santé sont liés ou non à une exposition au bruit en général permettront aussi de déterminer s'ils soulèvent des préoccupations par rapport au bruit des éoliennes et si d'autres recherches, plus spécifiques, sont nécessaires.

De plus, le comité d'experts a noté que peu de recherches avaient été menées sur les effets du bruit des éoliennes sur la santé chez les populations sensibles, y compris les enfants et les nourrissons, ainsi que chez populations concernées par des états cliniques qui peuvent conduire à une sensibilité accrue au bruit. Cela est vrai pour les recherches sur les effets potentiels de l'exposition au bruit sur le développement cognitif des enfants et sur leur apprentissage, mais également sur les effets du bruit ambiant en général sur la santé.

Tableau 7.1

Résumé des constatations au regard des effets néfastes sur la santé traités dans des recherches de population empiriques sur l'exposition au bruit des éoliennes

État ou symptôme	Niveau de preuve (CIRC)	Voies possibles	Lacunes dans les connaissances
Dérangement	Suffisante	Voie directe – l'exposition au bruit des éoliennes peut causer un dérangement; toutefois, l'effet peut être modifié par des facteurs tels que l'impact visuel et les attitudes.	• Rôle de l'impact visuel et des attitudes sur la perception des éoliennes. • Prévalence du dérangement dans les populations exposées, gravité de l'effet et seuils dans différentes conditions. • Rôle des différentes caractéristiques sonores (modulation d'amplitude, basses fréquences).

suite à la page suivante

État ou symptôme	Niveau de preuve (CIRC)	Voies possibles	Lacunes dans les connaissances
Perturbation du sommeil	Limitée	Voie directe et voies indirectes possibles (via le dérangement ou des réactions de stress ou les deux); toutefois, le bruit des éoliennes n'est probablement qu'un facteur parmi plusieurs autres altérant la qualité du sommeil.	• Nature du mécanisme (direct, indirect ou les deux) et prévalence relative et ampleur de l'effet pour chacun des mécanismes. • Effet des différentes caractéristiques sonores (y compris les composantes de basses fréquences) du bruit des éoliennes sur le sommeil. • Effets à long terme du bruit des éoliennes sur la perturbation du sommeil.
Stress	Insuffisante	Voie directe et voies indirectes possibles (via le dérangement ou la perturbation du sommeil ou les deux); toutefois, aucune preuve de lien direct n'a été trouvée. Le bruit des éoliennes pourrait n'être qu'un facteur parmi d'autres contribuant aux réactions de stress.	• Nature du mécanisme (direct, indirect ou les deux) et prévalence relative et ampleur de l'effet. • Incertitude à savoir si le mécanisme ou la réaction de stress est comparable avec d'autres sources de bruit ambiant. • Effet des différentes caractéristiques sonores sur le stress. • Effets à long terme du bruit des éoliennes sur le stress.
Système et maladies cardio-vasculaires (y compris hypertension, dysrhythmie cardiaque, tachycardie)	Insuffisante	Des recherches analogues indiquent qu'une voie directe et des voies indirectes (via le dérangement et le stress ou la perturbation du sommeil ou les deux) seraient possibles; toutefois, aucune preuve de lien avec le bruit des éoliennes n'a été trouvée.	• Preuve épidémiologique suffisante. • Effets à long terme d'une exposition. • Nature du mécanisme.
Diabète	Insuffisante	Des voies indirectes (via le stress, la perturbation du sommeil ou des combinaisons) sont plausibles; toutefois, les données reliant ces voies au bruit des éoliennes n'étaient pas cohérentes.	• Preuve épidémiologique suffisante. • Effets à long terme d'une exposition. • Nature du mécanisme et comparaison avec l'effet d'autres types de bruit ambiant.

suite à la page suivante

État ou symptôme	Niveau de preuve (CIRC)	Voies possibles	Lacunes dans les connaissances
Déficience auditive	Preuve de l'absence de lien causal	Une preuve suffisante a été trouvée dans les recherches sur d'autres types de bruit pour conclure qu'une exposition permanente à un bruit en deçà de 75 dB(A) ne cause pas une perte auditive, même pour une exposition sur une durée de vie entière.	
Acouphène	Insuffisante	Des recherches sur les acouphènes indiquent qu'une voie indirecte via le stress serait possible.	• Incertitude générale sur les causes des acouphènes et les liens avec d'autres états comme la déficience auditive.
Performance cognitive ou de tâches	Insuffisante	Des recherches sur d'autres types de bruit indiquent qu'une exposition au bruit peut altérer la performance cognitive; toutefois, le caractère de l'effet (favorable ou néfaste) et son ampleur varient en fonction d'un grand nombre de facteurs, dont les caractéristiques sonores et le type de tâche utilisé pour vérifier la performance cognitive.	• Comprendre comment l'exposition au bruit altère différents types de performance cognitive ou de tâche, notamment clarifier les définitions de cas et les mesures de la performance cognitive.
Santé psychologique (anxiété, dépression, détresse psycho-logique)	Insuffisante	L'exposition au bruit pourrait être un facteur contribuant à l'apparition ou à l'aggravation de troubles psychologiques.	• Compréhension générale des liens possibles entre une exposition au bruit et des troubles psychologiques.
Qualité de vie liée à la santé	Insuffisante	Aucun mécanisme confirmé ou postulé. L'exposition au bruit des éoliennes touche plusieurs catégories utilisées pour mesurer la qualité de vie, dont plusieurs recoupent les effets sur la santé examinés ici.	• Recherches sur les effets relatifs du bruit des éoliennes comparés à d'autres facteurs qui altèrent la qualité de vie.

Les états et symptômes suivants sont ceux qui ont été attribués au bruit des éoliennes par diverses sources (voir le tableau 5.1) et pour lesquels le comité d'experts n'a pas trouvé de recherches empiriques portant spécifiquement sur le bruit des éoliennes. Dans chaque cas, la preuve est insuffisante pour établir un lien causal avec le bruit des éoliennes..

Tableau 7.2

Effets sur la santé qui n'ont pas fait l'objet d'études empiriques de population sur le bruit des éoliennes

État ou symptôme	Voies possibles
Système immunitaire	
Immunité affaiblie	Une voie indirecte par le biais d'une réaction de stress est possible; toutefois, aucune des études évaluées n'utilisait de variable pouvant vérifier des liens entre le bruit des éoliennes et une immunité affaiblie.
Système musculosquelettique	
Douleurs dorsales Douleurs articulaires Douleurs musculaires (myalgie) Tremblements (paralysie)	Des voies indirectes par le biais du stress sont possibles; ces symptômes pourraient être causés par un grand nombre de facteurs et d'états médicaux. Aucune preuve concernant un lien avec le bruit des éoliennes n'a été trouvée dans la littérature.
Système nerveux	
Perturbations des sensations épidermiques	Aucune voie n'a été décrite ou proposée dans la littérature examinée.
Effets des sons inaudibles (oreille interne, cochlée, système vestibulaire)	Au sein de la plage normale des fréquences audibles, les sons doivent être à des niveaux très faibles pour être inaudibles et à ces niveaux, ils ne contribueraient à aucun type de dysfonction auditive connu. Pour les signaux de basse fréquence, y compris les infrasons, l'activation du système vestibulaire est possible si les niveaux des signaux sont élevés. Pour les sujets normaux et même pour les personnes concernées par certains états médicaux qui abaissent les seuils d'activation du système vestibulaire (par exemple, le syndrome de Tullio, la déhiscence du canal supérieur, une fistule périlymphatique ou une dilatation de l'aqueduc vestibulaire), les signaux émis par les éoliennes ne sont pas susceptibles d'atteindre le seuil d'activation. Il est par conséquent improbable que le bruit des éoliennes puisse causer directement des symptômes liés à une dysfonction du système vestibulaire comme le vertige, des étourdissements, des problèmes de vision ou des nausées.
Fatigue	La fatigue diurne est une conséquence fréquente d'une perturbation du sommeil.
Céphalées	Les céphalées sont parfois liées au dérangement causé par le bruit, mais ce lien n'a pas été établi de manière cohérente dans la littérature disponible. Plusieurs voies sont possibles (via le dérangement, la perturbation du sommeil ou le stress, ou des combinaisons); toutefois, le symptôme est associé à plusieurs voies de causalité possibles.
Nausée	Une voie basée sur la stimulation du système vestibulaire par le biais de sons inaudibles chez les populations concernées par certains états médicaux a été proposée; toutefois, aucune preuve de son existence n'a été trouvée.
Oppression de la poitrine	Aucune voie n'a été décrite ou proposée dans la littérature examinée.
Sensation de vibration interne	Aucune voie n'a été décrite ou proposée dans la littérature examinée.
Vertige, étourdissements	Voir les effets des sons inaudibles.
Problèmes de vision	Voir les effets des sons inaudibles.

suite à la page suivante

État ou symptôme	Voies possibles
Système nerveux : auditif	
Interférence dans la communication	Ce symptôme pourrait être le résultat du dérangement et est souvent une indication d'un dérangement causé par le bruit. Aucune preuve de lien n'a été trouvée, cependant.
Pression dans l'oreille ou douleur	Une voie basée sur l'activation de la cochlée par le son dans les populations concernées par certains états médicaux a été proposée; toutefois, aucune preuve de son existence n'a été trouvée.
Système respiratoire	
Saignement de nez	Aucune voie n'a été décrite ou proposée dans la littérature examinée.

Les états et symptômes suivants sont ceux qui ont été attribués au bruit des éoliennes par diverses sources (voir le tableau 5.1) et pour lesquels le comité d'experts n'a pas trouvé de recherches empiriques portant spécifiquement sur le bruit des éoliennes. Dans chaque cas, la preuve est insuffisante pour établir un lien causal avec le bruit des éoliennes.

7.2 QUALITÉ DES PREUVES EXAMINÉES

Compte tenu de la nouveauté relative des recherches sur les effets du bruit des éoliennes sur la santé, le comité d'experts a trouvé pertinent d'examiner la qualité générale des données disponibles en comparaison avec les recherches réalisées sur les effets d'autres stresseurs environnementaux sur la santé et de fournir un résumé des limites et des lacunes générales dans les connaissances observées.

Biais de sélection

Toutes les études de population et la plupart des expériences examinées par ce comité étaient fondées sur des données autodéclarées sur les effets sur la santé. Les sondages par autodéclaration sur des stresseurs environnementaux sont sujets à un biais de sélection (c.-à-d. que les gens contrariés par du bruit ambiant sont plus susceptibles de répondre à un sondage que ceux qui ne le sont pas) (Rief *et al.*, 2011). Afin de réduire le biais de sélection dans les sondages par autodéclaration transversaux, les chercheurs peuvent cacher, dans la mesure du possible, l'intention véritable de l'enquête. Les trois plus vastes études transversales examinées (SWE-00, SWE-05, NL-07) mentionnaient que les questionnaires utilisés étaient camouflés en sondages sur la qualité de vie en général. D'autres études mentionnaient que des méthodologies semblables avaient été utilisées, mais n'énonçaient pas explicitement si les questionnaires étaient suffisamment camouflés pour éviter un biais de sélection. Le comité d'experts a par conséquent noté que les preuves recensées pourraient présenter un biais de sélection à un certain degré.

Facteurs de confusions

Des facteurs autres que le bruit pourraient être responsables d'un état de santé. Si ces mêmes facteurs sont également associés à une exposition au bruit des éoliennes (par exemple, si ceux qui vivent plus près des éoliennes sont, par

hasard, plus âgés que la moyenne), il est possible qu'un facteur de confusion (dans cet exemple, l'âge) soit celui qui entraîne des effets néfastes sur la santé plutôt que le bruit des éoliennes. L'âge, les antécédents de santé, les états médicaux préexistants et les attitudes à l'égard des éoliennes ou de leur impact visuel pourraient être considérés comme des facteurs de confusion et doivent être pris en compte dans l'analyse des études. Bien que les études transversales recensées pour cette évaluation aient fait l'objet d'efforts raisonnables pour neutraliser ces facteurs de confusion potentiels, il est peu probable que ces facteurs aient pu être entièrement neutralisés.

Taille de l'échantillon

Dans une étude épidémiologique observationnelle, le nombre de personnes faisant l'objet de l'étude (la taille de l'échantillon) est important, pour plusieurs raisons. Le nombre exact requis dépend de la conception de l'étude, mais généralement, les études doivent comprendre un nombre suffisant de participants pour faire en sorte que soient adéquatement représentés chaque niveau d'exposition (par exemple, un groupe exposé et un groupe témoin) ainsi que, par exemple, chaque catégorie démographique (personnes âgées et jeunes, personnes de sexe masculin et féminin, etc.) afin de neutraliser les facteurs de confusion potentiels. Les chercheurs doivent aussi veiller à ce que la taille de l'échantillon soit suffisante pour exclure qu'un résultat soit le fruit du hasard. C'est ce qu'on appelle la signification statistique. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs, dont l'augmentation anticipée du risque pour les personnes exposées de contracter une maladie. Dans les études examinées par le comité d'experts, la taille des échantillons était suffisante pour évaluer le dérangement et la perturbation du sommeil, alors qu'elle était peut-être insuffisante pour détecter d'autres effets sur la santé, tels que les maladies cardiovasculaires, pour lesquels l'augmentation du risque anticipée pour les personnes exposées serait passablement faible.

Surveillance de l'exposition

Le comité d'experts a remarqué que la plupart des études examinées estimaient l'exposition au bruit des éoliennes à l'extérieur et à l'intérieur à l'aide de modèles informatiques, plutôt que d'observations directes. Une combinaison de mesures, d'expositions modélisées et de résultats sont nécessaires pour déterminer comment estimer l'exposition et ses effets. De plus, le comité a noté que les études utilisaient le plus souvent un niveau à long terme équivalent pondéré A (L_{Aeq}) pour décrire l'exposition au bruit. Toutefois, de telles méthodologies ne rendent pas compte des caractéristiques sonores telles que la modulation d'amplitude. Cerner les caractéristiques sonores particulières des éoliennes pourrait contribuer à mieux comprendre la cause de certains états de santé tels que le dérangement. Cette question est abordée plus en détail à la section 8.2.

La plupart des études épidémiologiques sur le bruit des éoliennes n'ont pas la puissance statistique nécessaire pour détecter des effets significatifs sur la santé ou leur conception ne permet pas d'exclure de façon convaincante un biais relatif aux résultats ou aux facteurs de confusion. En conséquence, les données sur un lien causal entre l'exposition au bruit des éoliennes et plusieurs effets sur la santé n'étaient pas cohérentes ou claires. Outre les questions décrites ci-dessus (biais de sélection, facteurs de confusion, taille des échantillons et surveillance de l'exposition), le comité d'experts a noté une absence d'études longitudinales sur la santé. Cependant, il reconnaît, dans le contexte des recherches concernant les effets sur la santé attribuables à une exposition au bruit des éoliennes, la difficulté de recruter de larges échantillons de participants et de les suivre au cours d'une certaine période de temps.

7.3 AUTRES RECHERCHES NÉCESSAIRES

Les données montrent que l'exposition au bruit des éoliennes est susceptible de causer un dérangement. Toutefois, on connaît peu de choses au Canada sur la prévalence du dérangement au sein de la population exposée au bruit des éoliennes. De plus, les données examinées indiquent qu'un lien pourrait exister entre le bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil ou le stress, soit par une voie directe ou par une voie médiée par le dérangement. Des recherches et de la surveillance additionnelles pourraient contribuer à mieux évaluer la prévalence au sein des populations générale et exposée. En particulier, des recherches seraient nécessaires pour acquérir des connaissances sur (1) l'incidence des effets sur la santé au sein de la population générale, (2) la proportion de la population exposée au bruit des éoliennes et (3) le risque supplémentaire de contracter une maladie associée à une exposition au bruit des éoliennes.

Un dérangement et une perturbation du sommeil chroniques sont liés à des réactions de stress attribuables à une exposition à long terme à d'autres types de bruit, dont la circulation aérienne et routière. De plus, ces sources de bruit constituent des facteurs de risque associés à d'autres effets sur la santé (les maladies cardiovasculaires, par exemple), lesquels sont également associés à une exposition à long terme à d'autres sources de bruit ambiant. D'autres recherches sur le stress et la perturbation du sommeil fourniraient des données additionnelles permettant d'évaluer le lien causal entre l'exposition au bruit des éoliennes et ces deux états. Parmi les recherches pertinentes, il faudrait des études fondées sur une conception appropriée (pour neutraliser le biais de sélection et les facteurs de confusion en particulier) et reposant sur des échantillons de taille suffisante pour garantir une puissance statistique adéquate. De telles recherches pourraient contribuer à mieux évaluer le lien causal entre le bruit des éoliennes et ces états. Au moment de mettre la dernière main au présent rapport (novembre 2014), les résultats préliminaires d'une vaste étude de Santé Canada venaient d'être rendus publics (voir l'encadré 7.1).

Encadré 7.1
Étude de Santé Canada sur le bruit des éoliennes et la santé

En 2012, Santé Canada a entrepris une vaste étude épidémiologique transversale couvrant approximativement 2 000 résidences. Cette étude avait pour but de mesurer les effets potentiels sur la santé recensés dans les secteurs exposés au bruit des éoliennes. Elle avait été conçue par Santé Canada, en collaboration avec Statistique Canada, pour fournir une base de preuves et éclairer les politiques publiques et les pratiques au Canada se rapportant à la mise en œuvre des projets d'énergie éolienne. Santé Canada a mesuré entre autres les effets suivants :

- La perturbation du sommeil, déterminée à l'aide d'un moniteur du sommeil qui surveille l'heure d'endormissement, la durée du sommeil et l'efficacité du sommeil. La qualité du sommeil a également été autoévaluée à l'aide d'un questionnaire.
- Le stress, déterminé d'après les concentrations de cortisol dans des échantillons de cheveux, la pression sanguine et la fréquence cardiaque ainsi que par un questionnaire (stress perçu).
- Le dérangement (« désagrément » dans cette étude) autodéclaré (à l'intérieur et à l'extérieur), déterminé par le biais d'un questionnaire rempli par les participants.
- La qualité de vie, déterminée à l'aide d'un questionnaire.

Les constats préliminaires de Santé Canada ont été rendus publics en novembre 2014. Le comité d'experts a examiné ces constats, mais comme ils étaient préliminaires, il n'a pu intégrer cette recherche à la preuve considérée au chapitre 6. Toutefois, le comité d'experts a noté que les constats de cette étude concordaient généralement avec ses propres conclusions. Les principaux résultats sont présentés ci-dessous.

Parmi les résidences choisies, 1 238 foyers (78,9 %) ont accepté de participer à l'étude. Les résultats préliminaires décrivent à la fois des états de santé autodéclarés et des mesures physiologiques. Concernant les états autodéclarés, l'étude n'a pas établi de liens entre l'exposition au bruit des éoliennes et des troubles autodéclarés du sommeil, des maladies autodéclarées (telles que des vertiges, des acouphènes et des mauxde tête) ou des maladies chroniques autodéclarées (par exemple des cardiopathies, l'hypertension et le diabète). L'étude n'a pas non plus trouvé de liens entre l'exposition au bruit et un stress perçu ou des changements dans la qualité de vie déclarés par les participants. Toutefois, elle a trouvé une relation entre des niveaux accrus de bruit provenant des éoliennes et un désagrément lié aux caractéristiques des éoliennes (bruit, effet stroboscopique, lumières clignotantes, vibrations et impacts visuels). Santé Canada a aussi pris des mesures physiologiques se rapportant au stress et à la qualité du sommeil et a trouvé que les mesures (par exemple, les concentrations de cortisol dans les cheveux, la pression sanguine,

suite à la page suivante

> les données fournies par le moniteur du sommeil) concordaient avec les résultats autodéclarés (aucune association entre les concentrations de cortisol, la pression sanguine, l'efficacité du sommeil et l'exposition au bruit des éoliennes n'a été établie).
>
> (Santé Canada, 2014a, 2014b)

7.4 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Après avoir examiné les données à sa disposition, le comité d'experts est revenu au cadre proposé au chapitre 5, qui décrivait les liens possibles entre l'exposition au bruit des éoliennes et les effets sur la santé. En se fondant sur la littérature examinée, dont des études sur d'autres types de bruit ambiant, le comité d'experts propose un modèle complexe de voies de causalité (figure 7.1), dans lequel les caractéristiques du bruit des éoliennes (basses fréquences, tonalités générées, modulation d'amplitude) sont modifiées par l'impact visuel, les attitudes personnelles, la sensibilité au bruit et des états médicaux existants. La combinaison de ces facteurs peut influer directement sur la santé, par la voie auditive, et sur les réponses cognitives et émotionnelles, via le traitement du cerveau.

Pour confirmer les voies causales possibles, des lacunes dans les connaissances doivent être comblées. Pour chacun des effets sur la santé, des pistes de recherche sont suggérées pour combler les lacunes relevées. Pour plusieurs autres symptômes pour lesquels aucune étude spécifique aux éoliennes n'a été trouvée, des voies causales plausibles sont suggérées d'après la littérature consultée.

Plusieurs des études examinées présentaient des limites ou des faiblesses de conception qui diminuaient la qualité de la preuve recueillie. Les études de population fondées sur des sondages remplis par des intéressés étaient sujettes à un biais de sélection, mais plusieurs ne citaient aucune mesure prise pour éviter cette lacune.

Les relations entre l'exposition au bruit, le dérangement chronique, la perturbation du sommeil et le stress constituent un domaine particulièrement intéressant à approfondir pour élucider les voies de causalité. Des recherches additionnelles sur certains effets spécifiques sur la santé seraient nécessaires pour mieux cerner l'incidence et la prévalence générales des effets sur la santé, la population exposée au bruit des éoliennes et les risques associés à l'exposition au bruit.

8

Pratiques prometteuses

- Technologies de conception
- Pratiques prometteuses pour la surveillance du bruit
- Acceptation croissante
- Résumé du chapitre

8 Pratiques prometteuses

Principales constatations

- Des conceptions d'éoliennes qui pourraient diminuer la production sonore sont à l'étude; à court terme, toutefois, le développement technologique ne résoudra probablement pas les enjeux actuels liés aux effets néfastes perçus du bruit des éoliennes sur la santé.
- Les niveaux de pression acoustique peuvent varier considérablement au sein d'une même structure — et même au sein d'une même pièce — en raison de l'interférence des ondes sonores réfléchies par les murs. Des protocoles de mesure améliorés ont été proposés pour tenir compte de façon plus précise de cette variation dans les niveaux sonores à l'intérieur des structures.
- D'autres études devraient être entreprises sur la modulation d'amplitude pour mieux cerner les effets potentiels du bruit des éoliennes sur la santé humaine. Des chercheurs locaux dans certains pays ont recommandé l'utilisation de mesures qui saisissent cette caractéristique.
- Les études d'impact et l'engagement communautaire fournissent aux collectivités de plus grandes connaissances et un meilleur contrôle sur les projets d'énergie éolienne.

Les chapitres précédents soulignent la complexité de la nature de la production, de la propagation et des effets potentiels sur les humains du son généré par les éoliennes. Le commanditaire a précisément demandé au comité d'experts d'examiner les pratiques en génie et dans d'autres domaines qui pourraient être adoptées pour réduire au minimum les réactions négatives de la population au bruit des éoliennes. À la lumière de ses constatations, le comité a ciblé plusieurs stratégies prometteuses, qui sont présentées dans ce chapitre :

- Réduire les émissions sonores à la source par l'adoption d'améliorations technologiques;
- Assurer une meilleure surveillance des caractéristiques sonores des éoliennes afin de mieux les comprendre, en utilisation des méthodes de mesure adéquates, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.
- Réaliser des évaluations d'impact appropriées et mener des activités d'engagement communautaire.

8.1 TECHNOLOGIES DE CONCEPTION

Les éoliennes commerciales modernes produisent du son d'origine mécanique et aérodynamique (voir le chapitre 3). Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, les sons d'origine mécanique des éoliennes modernes ne sont pas habituellement

très puissants, puisqu'ils sont considérablement atténués grâce à l'utilisation d'éléments de fabrication et de conception de grande qualité, notamment des éléments d'insonorisation et d'isolation appliqués entre les composants mécaniques et la structure de la nacelle (Hau, 2006). Ces progrès et d'autres de conception et de fabrication peuvent généralement réduire le bruit d'origine mécanique en deçà du niveau du bruit aérodynamique produit par les pales (Oerlemans, 2011).

Le bruit d'origine aérodynamique est produit par l'air qui s'écoule sur les différentes parties de la pale (voir la section 3.1.2). Aucune technologie pouvant à elle seule réduire radicalement la puissance sonore des éoliennes commerciales modernes n'a été trouvée, mais le comité d'experts a recensé des technologies et des pratiques d'atténuation du son qui sont actuellement à l'étude (Barone, 2011; Oerlemans, 2011) :

- l'optimisation des systèmes de commande de l'angle de calage;
- des modifications aux pales;
- des technologies de gestion de la réduction du régime pour atténuer au minimum le bruit et la perte de puissance.

8.1.1 Optimisation des systèmes de commande de l'angle de calage

Les éoliennes commerciales modernes utilisent les renseignements fournis par des capteurs de mesure du vent installés sur la nacelle pour apporter automatiquement des ajustements physiques à différentes parties de l'éolienne, par exemple pour modifier l'angle de calage des pales (inclinaison par rapport au plan de rotation) et leur vitesse de rotation, afin de générer la plus grande puissance possible (Manwell *et al.*, 2010). Les systèmes de commande de l'angle de calage permettent aux pales de tourner autour de leur axe longitudinal (du moyeu à l'extrémité de la pale). Un certain degré de contrôle peut ainsi être exercé sur l'angle d'attaque, ou l'angle avec lequel l'air entre en contact avec le bord d'attaque de la pale. Diminuer l'angle d'attaque peut atténuer les émissions sonores, mais seulement en sacrifiant une partie de la puissance produite (Oerlemans, 2011). Des recherches théoriques et empiriques se poursuivent pour optimiser les réglages de l'angle de calage afin de trouver un juste équilibre entre la puissance de production et l'atténuation du bruit (Manwell *et al.*, 2010; Bakker *et al.*, 2012). L'application de ces réglages en réponse aux variations constantes de la vitesse et de la direction du vent, cependant, pose des défis supplémentaires.

8.1.2 Modifications au bord de fuite

Même avec un angle de calage optimal, la source la plus commune de bruit aérodynamique est l'interaction entre l'écoulement d'air et le bord de fuite des pales des éoliennes (voir la section 3.1.2). Modifier la forme physique ou les propriétés du bord de fuite des pales peut par conséquent influer sur le

niveau et les caractéristiques des sons produits. Selon la théorie aéroacoustique, une dentelure ou des peignes le long du bord de fuite des pales permettrait une décorrélation du son et l'empêcherait de se propager aussi efficacement, réduisant par le fait même les émissions sonores aérodynamiques. Lors d'essais à pleine échelle, la dentelure des bords de fuite était plus efficace à des vitesses de vent élevées, réduisant le bruit de jusqu'à 5 dB pour des vents de 10 m/s (Barone, 2011; Oerlemans, 2011). Les niveaux de bruit ont été réduits en moyenne d'approximativement 3 dB, mais en présence de vents lents, des sons de haute fréquence additionnels étaient produits, réduisant l'efficacité de la dentelure des pales. Bien que la dentelure des bords de fuite se soit révélée prometteuse pour réduire le bruit des éoliennes, les mécanismes responsables ne sont pas encore bien compris (Barone, 2011).

8.1.3 Réduction du régime

La réduction du régime désigne le fait de sacrifier une partie de la puissance produite pour diminuer le niveau sonore en deçà d'un seuil acceptable. Comme nous l'avons vu plus haut, cela pourrait se faire en ajustant l'angle de calage des pales pour réduire l'angle d'attaque ou en réduisant la vitesse de rotation des éoliennes, dans la mesure du possible (Oerlemans, 2011). Dans des cas extrêmes, les éoliennes doivent être arrêtées pour éviter l'émission de bruit.

La réduction du régime constitue souvent une solution de dernier recours qui est mise en œuvre lorsque les autres ajustements ne réussissent pas à réduire les émissions sonores en deçà des limites en vigueur. Elle est habituellement appliquée la nuit ou lorsque le vent souffle dans certaines directions ou au-dessus de certaines vitesses, afin de diminuer les niveaux de bruit auxquels les résidents sont exposés à certains endroits (EPA, 2011). Cibler les conditions précises en vertu desquelles la réduction de régime est nécessaire pourrait contribuer à diminuer la nécessité de l'utiliser. Par conséquent, l'amélioration des capteurs de mesure du vent et des systèmes automatisés offrirait une autre solution pour limiter la puissance qui doit être sacrifiée pour réduire les niveaux sonores. S'il est déterminé que certains niveaux ou types de turbulence intensifient la modulation d'amplitude, des capteurs météorologiques (par exemple, des LIDAR ou des SODAR) pourraient être utilisés pour détecter de telles conditions météorologiques avant qu'elles atteignent l'éolienne et le fonctionnement pourrait être ajusté en conséquence, en changeant l'angle de calage des pales ou en réduisant la puissance de sortie (RenewableUK, 2013).

8.1.4 Amélioration technologique continue dans un marché mondial

Les technologies décrites ci-dessus sont des exemples de méthodes jugées prometteuses pour réduire les niveaux de bruit dans certaines situations, mais le comité d'experts note qu'aucune solution n'est susceptible par elle-même

de répondre à brève échéance à toutes les préoccupations liées au bruit. Néanmoins, la poursuite des recherches sur la conception et la fabrication des éoliennes laisse entrevoir une évolution constante des technologies dans ce domaine. Depuis plus de 20 ans, de nombreuses petites améliorations se sont combinées pour réduire le niveau de puissance acoustique global des éoliennes par rapport à un rotor de même diamètre. Cela a permis de mettre en service des éoliennes de plus grande taille, mais aux niveaux d'émissions sonores comparables aux plus petites éoliennes de conception antérieure.

Le comité d'experts a aussi noté que les fabricants d'éoliennes vendent leurs produits sur un marché mondial. À l'échelle individuelle, un pays comme le Canada n'aurait donc qu'une capacité limitée d'influencer les tendances technologiques par l'imposition de normes de conception, puisque les fabricants d'éoliennes vendent leurs produits partout dans le monde (voir le chapitre 2). La plupart des normes de conception, de fabrication et de mesure du son des éoliennes sont établies par des organisations internationales, telles que la Commission électrotechnique internationale (IEC) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

La réglementation canadienne pourrait avoir une influence sur le choix des technologies d'éoliennes qui seraient utilisées ici. Les limites et règlements relatifs au bruit sont souvent établis à l'échelle nationale, provinciale et même locale. Par conséquent, même si la réglementation et les limites de bruit n'influencent pas directement le développement technologique, elles peuvent déterminer quelles technologies sont utilisées et la façon dont elles sont appliquées.

8.2 PRATIQUES PROMETTEUSES POUR LA SURVEILLANCE DU BRUIT

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les limites relatives au bruit constituent un outil important et nécessaire pour limiter l'exposition au bruit des éoliennes. Il est essentiel de pouvoir mesurer avec précision le son produit par les éoliennes pour être en mesure d'éclairer de tels règlements, mais aussi pour mieux comprendre l'effet du bruit des éoliennes à des fins de recherche. Le comité d'experts a déterminé quatre critères importants à prendre en compte dans l'établissement des lignes directrices applicables au bruit et dans le mesurage du son : le bruit de fond, la prise de mesures à l'intérieur, la prise de mesures la nuit et la mesure de la modulation d'amplitude.

8.2.1 Bruit de fond

Le bruit de fond est un élément important de la perception des sons. Un son particulier est plus perceptible si les signaux sonores concurrents sont à des niveaux de pression acoustique inférieurs; c'est-à-dire, si le bruit de fond est absent ou faible. Cet effet est traduit par le seuil d'audition avec effet de masque (voir le chapitre 4), soit le niveau de pression acoustique auquel le son peut être entendu en présence de signaux sonores concurrents comme le bruit de fond. L'effet du bruit de fond a été observé dans les recherches sur le son des éoliennes (voir le chapitre 6). Des études ont démontré que, pour une même exposition, la sensation de dérangement était plus fréquemment signalée dans des zones rurales plus calmes que dans des zones urbaines plus bruyantes (Pedersen et Persson Waye, 2007).

Le vent peut contribuer au bruit de fond au même titre que le bruit produit par les éoliennes. Comme nous l'avons vu au chapitre 3, la vitesse du vent à la hauteur des pales peut être beaucoup plus élevée qu'à la hauteur du sol, un effet appelé cisaillement du vent. En conséquence, la vitesse élevée à la hauteur des pales augmente le niveau de bruit, mais la vitesse plus faible du vent au sol réduit pour les résidents l'effet de masque lié au son naturel du vent. Par exemple, en Suède, une attention particulière est accordée aux résidences situées dans des zones à l'abri du vent, où la vitesse du vent est approximativement la moitié de celle que l'on retrouve sur le site du parc éolien. Dans de telles zones, le son des éoliennes est plus perceptible que dans les zones exposées au vent (Persson Waye, communication personnelle). Lors de l'établissement de la réglementation sur le bruit, tenir compte du bruit de fond ajoute un niveau de complexité, puisque celui-ci change en fonction de facteurs qui varient dans le temps (par exemple, la vitesse du vent).

8.2.2 Prise de mesures à l'intérieur

La prise de mesures à l'intérieur des constructions est particulièrement importante pour déterminer l'exposition au bruit ambiant, y compris au bruit des éoliennes, puisque ce bruit peut affecter les gens dans leurs résidences, particulièrement la nuit, pendant leur sommeil. De plus, le son relativement grave des éoliennes perd moins d'énergie que les sons plus aigus lorsqu'il traverse les murs et les fenêtres (voir le chapitre 3). Par ailleurs, l'interférence entre les ondes sonores peut engendrer de grandes variations du niveau de pression acoustique au sein d'une même pièce.

Des lignes directrices spécifiques ont été établies pour encadrer le mesurage des sons de basse fréquence à l'intérieur des constructions (Jakobsen, 2001; Pedersen *et al.*, 2007b; HGC Engineering, 2010). Toutefois, en raison des variations de niveau de pression acoustique mentionnées ci-dessus, il est difficile de mesurer le son à l'intérieur. Les variations résultent de la réflexion des ondes sonores

sur les murs, laquelle cause de l'interférence avec l'onde originale. Le profil de niveaux de pression acoustique élevés et faibles qui en résulte s'appelle une onde stationnaire : à basses fréquences, l'onde stationnaire peut engendrer de grandes différences de niveaux sonores entre les diverses parties d'une pièce. Malgré cette difficulté, il existe des méthodes pour mesurer avec précision les niveaux de pression acoustique à l'intérieur des constructions. Par exemple, Pedersen *et al.* (2007b) ont proposé un protocole amélioré pour mesurer de manière plus précise les sons à l'intérieur (voir l'encadré 8.1). Cependant, de telles prises de mesure ne sont pas toujours possibles. Certains pays, comme le Danemark, n'utilisent pas la prise de mesures à l'intérieur et s'appuient plutôt sur des simulations informatiques pour évaluer la conformité à la réglementation (DME, 2011).

Encadré 8.1
Méthodologie améliorée pour mesurer la pression acoustique à l'intérieur

Du fait de l'interférence qui se produit entre les ondes sonores à l'intérieur d'une structure, le niveau de pression acoustique des sons de basse fréquence peut varier de 20 et même 30 dB selon l'endroit précis où l'on se trouve. Il est donc important de mesurer adéquatement le bruit à divers endroits dans une même pièce où se produisent des niveaux de pression acoustique élevés pour déterminer les causes du dérangement. Pedersen *et al.* (2007b) ont étudié les méthodes couramment utilisées pour mesurer le son à l'intérieur et ont conclu que ces méthodes n'étaient pas optimales. Ils ont par conséquent proposé une nouvelle méthodologie. Cette méthodologie est basée sur la moyenne des mesures de niveau de pression acoustique prises aux quatre coins d'une pièce à une distance maximale de 0,1 mètre des limites de la pièce (Pedersen *et al.*, 2007b).

8.2.3 Prise de mesures la nuit

Contrairement au bruit de la circulation routière, qui diminue la nuit, le bruit des éoliennes peut persister la nuit lorsque le bruit de fond diminue. Le bruit est par conséquent plus perceptible la nuit et plus susceptible d'affecter le sommeil. L'OMS a recommandé que les niveaux de pression acoustique ne dépassent pas 40 dB(A) la nuit (à l'extérieur), dans les zones habitées (OMS, 2009). Ellenbogen *et al.* (2012) ont recommandé de limiter le bruit nocturne à 37 dB(A) dans les zones résidentielles (vent de 6 m/s) et à 42 dB(A) (vent de 6 m/s) dans les zones peu peuplées. Diverses normes ont été établies pour faire état des niveaux de pression acoustique diurnes et nocturnes, une « pénalité »

étant souvent ajoutée à l'exposition nocturne mesurée. Par exemple, L_{dn} hausse de 10 dB(A) à l'exposition nocturne (voir le chapitre 3). Le comité d'experts reconnaît l'utilité de mesurer l'exposition nocturne au bruit des éoliennes, une pratique qui n'est pas très répandue au Canada.

8.2.4 Méthodes de mesure permettant de mieux évaluer les effets possibles du bruit des éoliennes sur la santé

Il y a plusieurs façons de décrire et de mesurer l'exposition sonore et chacune accentue l'importance de certaines caractéristiques sonores et atténue l'importance d'autres (par exemple, le niveau de pression, la fréquence, la modulation d'amplitude; vois le chapitre 3). Comme le mentionnent les *Directives de l'OMS relatives au bruit dans l'environnement*, « une relation multidimensionnelle très complexe unit les diverses caractéristiques du bruit ambiant et les effets qu'il produit sur les gens » [traduction] (OMS, 1999). Des normes appropriées de mesurage et de déclaration sont importantes parce qu'elles permettent une comparaison des niveaux sonores rapportés dans les différentes études et qu'elles contribuent à définir et à clarifier les caractéristiques sonores associées aux effets néfastes sur la santé qui sont signalés.

Comme il a été mentionné précédemment dans ce rapport, le son produit par les éoliennes possède les caractéristiques suivantes : (1) il est à large bande et composé d'une gamme de fréquences, dont des sons de basse fréquence; (2) ses plus hautes fréquences ont davantage tendance à être atténuées à l'intérieur et à distance croissance, ce qui accentue l'importance relative des composantes de basse fréquence; (3) il peut faire l'objet d'une modulation d'amplitude périodique; et (4) son niveau de puissance acoustique varie selon la vitesse du vent qui passe à la hauteur du moyeu. Les deux premières caractéristiques sont des attributs fréquents de sons ambiants tels que le son du vent.

En examinant la littérature propre aux éoliennes, le comité d'experts a noté que la plupart des mesures utilisées dans les articles de recherche étaient présentées comme des moyennes temporelles pondérées A (L_{Aeq}; voir le tableau 3.1). Bien que les mesures pondérées A soient celles qui correspondent le plus à ce qu'entend l'oreille humaine et qu'elles aient été largement adoptées, elles ne captent pas adéquatement les composantes de basse fréquence du bruit des éoliennes. De plus, la modulation d'amplitude périodique (sifflement ou battement sourd), une caractéristique particulière du bruit des éoliennes, n'est pas représentée par les indicateurs à moyenne temporelle (par exemple, L_{eq}) (RenewableUK, 2013). La modulation d'amplitude périodique et la prépondérance des composantes de basse fréquence peuvent contribuer aux effets du bruit sur la santé, tels que le dérangement, comme l'indique le chapitre 6. Ces caractéristiques sont essentielles à une meilleure compréhension

des effets du bruit des éoliennes sur les humains. Une méthode permettant de mieux mesurer la modulation d'amplitude du bruit des éoliennes est présentée dans l'encadré 8.2.

Encadré 8.2
Mesure améliorée de la modulation d'amplitude

Un récent rapport a évalué les diverses méthodes utilisées pour mesurer le son afin de déterminer celles qui permettent le mieux de caractériser le bruit des éoliennes (Kaliski, 2014). Le rapport a été produit pour le Massachusetts Wind Turbine Noise Technical Advisory Group (WNTAG), qui conseille le Département de protection environnementale (MassDEP) du Massachusetts en matière de réglementation et de politiques relatives au bruit des éoliennes (CoM, 2014). Dans le cadre de ses activités, le WNTAG a colligé approximativement 120 millions d'enregistrements sonores d'éoliennes dans 150 conditions différentes (météorologiques et opérationnelles, par exemple). Cette évaluation constitue un bon point de départ à une meilleure compréhension des caractéristiques du bruit des éoliennes.

Le rapport soutient que la meilleure mesure pour faire état de la modulation d'amplitude du son est le niveau de pression acoustique avec pondération temporelle rapide (L_{Af}),* qui est déjà utilisé par le MassDEP pour évaluer les « sons répétitifs de courte durée » [traduction]. Utiliser un L_{Afmax} d'une seconde « permet de comparer les niveaux acoustiques du bruit de fond et de bruit opérationnel pour des vitesses de vent similaires, sans ignorer les pointes de modulation d'amplitude » [traduction] (Kaliski, 2014). Le recours à ces mesures brèves pour saisir la modulation d'amplitude a aussi été suggéré dans des conclusions de recherches primaires (RenewableUK, 2013). Il a été démontré que de telles mesures constituent de bons indicateurs du risque de dérangement (Seong *et al.*, 2013) (voir le chapitre 6).

* Pour de plus amples informations sur les mesures sonores avec pondération temporelle, voir la figure 3.6.

8.3 ACCEPTATION CROISSANTE

Au chapitre 6, le comité d'experts a conclu que le dérangement résulte de combinaisons de facteurs contributifs, qui comprennent notamment l'attitude personnelle. Des études ont montré que les résidents qui avaient des attitudes négatives à l'endroit de l'énergie éolienne étaient plus susceptibles d'être dérangés que ceux qui avaient des attitudes positives. Les attitudes négatives

à l'égard de l'énergie éolienne peuvent être déclenchées par un processus qui est jugé inéquitable. Par exemple, Krogh (2011) a illustré la relation entre l'exploitation de l'énergie éolienne, les effets sur la santé et la perte de justice sociale. L'auteur a soutenu qu'une perte de justice sociale découlait de plusieurs facteurs associés à l'exploitation de l'énergie éolienne, y compris « un processus injuste, la perte de droits et le sentiment de marginalisation qui en résulte » [traduction]. Il a aussi soutenu que l'absence de consultation des collectivités ainsi que la construction d'un grand nombre d'éoliennes au cours de brèves périodes dans certaines régions du Canada avaient exacerbé le sentiment d'injustice et avaient eu des incidences sociales négatives. Dans cette section, le comité d'experts décrit les pratiques relatives aux évaluations d'impact et à l'engagement communautaire.

8.3.1 Études d'impact sur l'environnement et sur la santé

Afin de se conformer à la réglementation sur le bruit en vigueur pour un site potentiel, les promoteurs d'énergie éolienne peuvent devoir entreprendre une étude d'impact environnemental avant de mettre en œuvre un projet de parc éolien, suivant l'endroit choisi ainsi que la taille et la puissance du parc envisagé. Au Canada, il n'y a pas d'exigences fédérales à cet égard, sauf pour les terres qui sont de compétence fédérale (Haugen, 2011). Les règles peuvent varier selon la province ou le territoire. Par exemple, en vertu des règles de l'Alberta Utilities Commission, avant de lancer un nouveau projet énergétique, les demandeurs doivent présenter une étude de l'impact du bruit et prévoir l'impact que le bruit des installations aura, dans des conditions normales, sur les résidences les plus exposées (AUC, 2013). Le ministère de l'Environnement de l'Ontario exige également un Rapport d'évaluation du bruit pour tous les projets d'énergie éolienne proposés et fournit des lignes directrices détaillées pour la réalisation des évaluations d'impact du bruit (ME, 2008). Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec fournit également des directives pour la réalisation d'une évaluation de l'impact du bruit (MDDELCC, 2006). Outre le Canada, d'autres pays ont établi des exigences semblables. Par exemple, le Département irlandais de l'environnement a élaboré des lignes directrices particulièrement exhaustives pour l'évaluation des incidences des projets éoliens (encadré 8.3).

Encadré 8.3
Évaluer les incidences des projets d'énergie éolienne : l'exemple de l'Irlande

En République d'Irlande, le ministère de l'Environnement, des Collectivités et de l'Administration locale (DECLG), l'organisme de réglementation chargé entre autres d'encadrer l'exploitation de l'énergie éolienne, exige des promoteurs qu'ils réalisent des évaluations d'impact exhaustives qui couvrent les domaines de la sécurité (éloignement), de l'environnement (sites patrimoniaux, bruit, effet stroboscopique et visibilité), l'écologie, ainsi que la viabilité sociale et économique. Ces lignes directrices s'appliquent aux activités s'échelonnant des consultations préalables au dépôt des demandes d'autorisation au déclassement et à la réhabilitation des sites. En particulier, le DECLG recommande que chaque promoteur consulte la collectivité locale dès le stade du processus de planification pour permettre aux collectivités de bien faire valoir leurs préoccupations. Des mesures appropriées d'atténuation et d'indemnisation doivent être établies avant la construction pour pallier les impacts ou changements qui n'ont pas été précédemment anticipés.

(DEHLG, 2006)

8.3.2 Engagement communautaire

> Le succès de l'énergie éolienne dépend de la mesure dans laquelle l'industrie éolienne apprend à laisser le public prendre part aux décisions, à la fois pour les possibilités de diffusion élargie de l'information sur l'énergie éolienne que cela permet et pour les suggestions que peut apporter le public à la discussion sur ses préoccupations et sur la manière d'y répondre [traduction].
>
> (Pasqualetti, 2002)

Les résidents veulent avoir l'occasion de participer au processus de sélection des sites où seront installées des éoliennes, puisque l'équité et la justice sont essentielles à l'acceptation de la collectivité (Wolsink, 2007). Des approches collaboratives peuvent donner aux collectivités locales l'occasion de discuter de la question et de faire entendre leurs préoccupations (Toke *et al.*, 2008). Diverses pratiques exemplaires existent pour guider les promoteurs de projets éoliens et les décideurs politiques en matière d'engagement communautaire (RABDTI, 2007; CanWEA, s.d.).

L'objectif de l'engagement communautaire est d'informer et d'éduquer les résidents locaux et de les impliquer dans le projet d'énergie éolienne, mettant spécifiquement en relief ses avantages et prenant en compte les préoccupations locales, dans le but de parvenir à une acceptation sociale. Les techniques pouvant être utilisées pour faire participer le public incluent des processus tels que des référendums, des audiences publiques, des sondages publics et des règlements négociés (Jami et Walsh, 2014).

Outre la mise en œuvre des distances minimales d'éloignement et des limites de bruit, la plupart des pratiques exemplaires internationales recommandent fortement que le promoteur d'énergie éolienne consulte les autorités et les résidents locaux et qu'il communique avec eux dès les premiers stades de l'élaboration d'un projet. Par exemple, le gouvernement australien reconnaît que la consultation des collectivités est un processus bidirectionnel important qui vise à informer les parties prenantes et à inciter activement les résidents locaux à faire part de leur point de vue et à poser des questions (EPHC, 2010) (voir l'encadré 8.4). Un nouveau modèle pour le dérangement provoqué par le bruit ambiant est pertinent dans le contexte de l'engagement communautaire : « le paysage sonore » — un concept avancé pour mesurer de manière exhaustive l'effet potentiel du bruit sur la qualité de vie (Schulte-Fortkamp, 2014). Les techniques se rapportant au paysage sonore prennent en compte à la fois le contexte et la perception du son et considèrent que la réponse humaine ne constitue pas un simple facteur, mais qu'elle est reliée à la perception humaine de la situation (Schomer *et al.*, 2010).

Encadré 8.4
Lignes directrices en matière d'engagement communautaire

Le Conseil australien de protection de l'environnement et du patrimoine (EPHC) a adopté une série de lignes directrices pour aider les promoteurs à obtenir la participation des parties prenantes à la préparation des projets éoliens. Ces lignes directrices ont pour objectif de fournir :

- Des principes et des considérations dont doivent tenir compte les promoteurs de projets éoliens relatifs à la planification et à la mise en œuvre des activités de mobilisation des parties prenantes.
- Des recommandations concernant la contribution des parties prenantes aux évaluations et la manière de gérer les principaux volets de l'étude (y compris le bruit).

suite à la page suivante

> Ces lignes directrices couvrent les diverses étapes de la préparation d'un projet éolien : le choix d'un site, l'évaluation de la faisabilité du projet, la demande de planification, la construction, l'exploitation et le déclassement. Pour chaque étape d'un projet, l'EPHC recommande des jalons précis qui doivent être atteints, tels que la sollicitation continue de l'avis et des commentaires des parties prenantes aux stades de l'examen de la faisabilité et de la planification du projet pour mieux cerner leurs préoccupations et leurs opinions. Concernant le bruit, les lignes directrices recommandent de mesurer le bruit de fond aux étapes de l'examen de la faisabilité du projet et de la construction du parc éolien, ainsi que d'assurer une surveillance du bruit sur les propriétés des parties prenantes ciblées. Bien que ces lignes directrices aient été élaborées en Australie, les principes généraux de gestion et de communication des risques peuvent facilement être appliqués au contexte canadien.
>
> (EPHC, 2010)

En combinant des enquêtes publiques et des évaluations d'impact environnemental, plusieurs pays européens ont réussi à atténuer la polémique que suscitent les projets éoliens, en grande partie en permettant aux collectivités de participer au processus et d'en tirer directement avantage (CSE, 2009).

8.4 RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Les améliorations technologiques apportées depuis vingt ans dans la conception des éoliennes ont permis la construction d'éoliennes de plus grande taille et puissance. Bien que les éoliennes actuelles produisent moins de bruit que les éoliennes de même taille de la génération précédente, cet effet est contrebalancé par l'augmentation de leur taille et de leur capacité électrique. Certaines technologies prometteuses sont à l'étude pour diminuer la production sonore, mais aucune technologie « miracle » ne résoudra tous les problèmes de bruit associés aux éoliennes. Les mesures réglementaires (limites de bruit et éloignement) actuellement en vigueur au Canada et ailleurs dans le monde demeureront par conséquent nécessaires. Plusieurs de ces mesures ont pris en compte la nécessité d'apporter des ajustements en fonction des différentes vitesses du vent, des différences qui existent ente les conditions diurnes et nocturnes ainsi que du bruit de fond.

Ces ajustements seront importants pour toute mesure réglementaire prise dans le futur, mais ils s'appuient tous sur des mesures sonores. Des techniques et normes de mesure doivent être établies, puisque les moyennes temporelles pondérées A actuellement utilisées ne reproduisent pas certains aspects du bruit

des éoliennes, en particulier de la modulation d'amplitude. Il est important de mesurer le son à l'intérieur des structures pour capter les sons qui affectent les résidents, mais cela peut être difficile en raison des grandes variations de niveau de pression acoustique qui existent dans les différentes parties d'une même pièce.

Heureusement, plusieurs pratiques exemplaires en vigueur dans le monde dans ces domaines peuvent éclairer les futures orientations canadiennes, telles que le choix des paramètres de mesure et des méthodes de mesure des niveaux de pression acoustique à l'intérieur des structures. Toutefois, comme la perception des éoliennes est liée à des aspects autres que le son, l'évaluation de l'impact sur la santé et sur l'environnement ainsi que l'engagement communautaire sont également essentiels. Plusieurs études réalisées de par le monde ont montré que l'évaluation environnementale, réalisée de l'étape de la proposition du projet jusqu'après l'installation, contribue à assurer la réussite et l'acceptation des projets éoliens. L'engagement des collectivités se traduit par une plus grande acceptation et une plus grande implication. Ces mesures pourraient également atténuer des effets sur la santé en fournissant des données et des informations et en contribuant à améliorer les attitudes à l'égard des projets éoliens.

9

Conclusions

- Réflexions finales

9 Conclusions

Ce chapitre synthétise les constatations et les preuves présentées dans les précédents chapitres pour résumer les conclusions du comité d'experts par rapport au mandat confié par le commanditaire. Les réponses à la principale question et aux sous-questions posées par le commanditaire sont données individuellement.

Avons-nous des preuves reliant l'exposition au bruit des éoliennes à des effets néfastes sur la santé?

Le comité d'experts a relevé des preuves ***suffisantes*** pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et un dérangement et des ***preuves limitées*** pour établir une relation causale entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil. Le comité a relevé des preuves indiquant qu'il n'y a ***pas de lien de causalité*** entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perte auditive. Les preuves disponibles étaient ***insuffisantes*** pour parvenir à une conclusion concernant un lien de causalité pour tous les autres effets sur la santé examinés (voir le chapitre 6 pour plus de détails, résumés dans les tableaux 7.1 et 7.2). Bien que les preuves d'une association entre le bruit des éoliennes et le stress soient incohérentes et d'une qualité insuffisante pour parvenir à des conclusions définitives, le stress a été associé à de nombreuses autres sources de bruit ambiant, souvent en lien avec le dérangement et la perturbation du sommeil. Néanmoins, les liens de causalité entre ces trois effets sont souvent peu clairs : chacun des effets peut conduire à un autre et plus d'une voie de causalité peut vraisemblablement exister pour chaque cas d'effet sur la santé observé au sein d'une population. D'autres effets sur la santé fréquemment attribués au bruit des éoliennes, notamment les céphalées et les interférences de communication, ont été associés à plusieurs facteurs. Toutefois, aucune recherche empirique n'a établi de relation causale entre ces effets et le bruit des éoliennes.

Certains mécanismes de causalité additionnels ont été proposés concernant un lien entre le bruit des éoliennes et des symptômes comme le vertige, les étourdissements, la nausée ou des problèmes de vision. De tels symptômes seraient compatibles avec une stimulation du système vestibulaire, qui peut être activé par des sons générés à des niveaux supérieurs aux seuils normaux de l'audition humaine pour les infrasons et les sons de basse fréquence. Les personnes plus sensibles en raison de certains états cliniques pourraient avoir des seuils d'activation plus bas, inférieurs au seuil d'une oreille normale, mais

la possibilité que de tels seuils d'activation puissent se situer dans la gamme typique des niveaux sonores produits par les éoliennes et la prévalence de ces états dans les populations exposées au bruit des éoliennes n'ont toujours pas été établies avec certitude. Toutefois, le comité d'experts a conclu que les signaux produits par les éoliennes ne sont pas susceptibles d'atteindre le seuil d'activation chez les humains.

Quelles lacunes doit-on combler dans les connaissances scientifiques et technologiques afin de permettre une évaluation complète des incidences possibles sur la santé du bruit produit par les éoliennes?

Le comité d'experts a relevé pour chaque état de santé étudié des lacunes spécifiques dans les connaissances, pour lesquelles des types de preuves particuliers permettraient de clarifier la force des liens, d'éviter les biais ou d'éliminer les possibles facteurs de confusion par rapport à l'exposition au bruit des éoliennes. Par exemple, il n'a pas été établi de façon nette si le dérangement est causé uniquement par le bruit des éoliennes ou si des facteurs tels que l'impact visuel et les attitudes personnelles modifient la relation bruit-dérangement. La voie possible pouvant conduire à une perturbation du sommeil ou à un stress n'est pas clairement définie non plus. Nous ne savons pas clairement par ailleurs si la voie pouvant conduire à une perturbation du sommeil ou au stress est la conséquence directe de l'exposition au bruit des éoliennes ou si elle peut être influencée par un dérangement, celui-ci jouant un rôle de facteur médiateur. Le comité d'experts a de plus noté que les lacunes dans les connaissances se rapportant aux populations potentiellement sensibles telles que les enfants et les nourrissons ainsi que les personnes souffrant de certains états cliniques, compliquent toutes les tentatives d'évaluer le degré de risque pour la santé associé à l'exposition au bruit des éoliennes. En outre, le comité a relevé un manque de données sur les effets néfastes sur la santé à l'échelle d'une population, lesquelles pourraient être recueillies par des recherches fondées sur une conception rigoureuse qui réduirait au minium les biais et les facteurs de confusion et qui permettrait de relier des effets à des mesures d'exposition.

En examinant les preuves existantes, le comité a noté que la plupart des études transversales s'appuyaient sur des méthodes normalisées de modélisation pour estimer les niveaux de pression acoustique. Des combinaisons de données mesurées et modélisées ainsi que d'effets recensés seraient souhaitables pour déterminer de façon définitive comment estimer l'exposition et ses effets. De plus, la modélisation et certaines méthodes de mesure ne rendent pas compte

de plusieurs caractéristiques sonores qui se rapportent aux éoliennes, telles que la modulation d'amplitude. Pouvoir associer les caractéristiques sonores particulières des éoliennes à des effets pourrait aider les chercheurs à mieux cerner la cause de certains états de santé comme le dérangement.

Le risque potentiel pour la santé humaine est-il suffisamment plausible pour justifier d'autres recherches sur l'association entre l'exposition au bruit des éoliennes et des effets néfastes sur la santé?

En examinant la littérature, le comité a relevé plusieurs lacunes en recherche et dans les connaissances se rapportant aux voies de causalité. Toutefois, il souligne qu'il ne relevait pas de son mandat de déterminer si une priorité devait être accordée à certaines recherches particulières plutôt qu'à d'autres recherches en santé publique ou de fournir des recommandations en faveur de certains types de recherche en particulier. Le comité peut cependant suggérer des orientations de recherche qui seraient utiles pour combler les lacunes observées.

Des questions et des incertitudes subsistent au regard de plusieurs effets néfastes sur la santé. Parmi le large éventail d'effets sur la santé attribués à l'exposition au bruit des éoliennes, plusieurs sont possiblement des conséquences secondaires d'une perturbation du sommeil ou d'un stress de longue durée, mais attribuables à d'autres causes. Par exemple, on sait que les maladies cardiovasculaires, un ensemble d'états responsables d'un tiers des décès au Canada, sont influencées à long terme par le dérangement, la perturbation du sommeil et le stress. Il serait par conséquent bon de mieux connaître les risques potentiels liés à une exposition à long terme au bruit des éoliennes et d'étudier plus avant la relation causale qui existe entre l'exposition au bruit des éoliennes et la perturbation du sommeil et le stress.

Bien que le niveau du bruit des éoliennes semble comparable à celui d'autres bruits ambiants communs, certains attributs sont plus caractéristiques du son des éoliennes que de celui d'autres sources, comme la modulation d'amplitude périodique (causant un sifflement ou un battement sourd) et les variations liées à la vitesse du vent à la hauteur des pales (qui peut atteindre 60 mètres au-dessus du sol et, dans ceratins cas, dépasser 100 mètres). La poursuite des recherches pourrait permettre de déterminer les mesures d'exposition sonore les plus pertinentes pour établir des liens avec des effets sur la santé et de mieux comprendre les mécanismes responsables du dérangement ou d'autres effets plausibles sur la santé d'une exposition au bruit des éoliennes ou

d'autres sources. En particulier, le comité d'experts a noté que la modulation d'amplitude périodique pourrait être une des principales composantes du bruit des éoliennes qui cause un dérangement.

Comment le Canada se compare-t-il internationalement quant à la prévalence et à la nature des effets néfastes sur la santé des populations vivant à proximité d'installations éoliennes commerciales?

Le comité n'a pas trouvé suffisamment de données relatives au Canada pour répondre à cette question. Toutefois, concernant la nature des effets sur la santé, il n'y a pas de raison de soupçonner que les effets potentiels sur la santé de notre population pourraient être très différents par rapport à d'autres pays. Les conclusions sur les effets sur la santé tirées d'études menées de par le monde s'appliqueraient par conséquent au Canada. Concernant la prévalence de ces effets, aucune étude de population citée dans ce rapport n'avait été menée au Canada. Leurs conclusions ne permettent donc pas de comparer la prévalence des effets néfastes sur la santé au Canada avec celle d'autres pays. Au moment de rédiger le présent rapport, Santé Canada venait de publier les résultats préliminaires de la première étude à avoir jamais combiné des mesures subjectives et objectives sur la santé avec des données mesurées et modélisées sur les niveaux de pression acoustique produits par les éoliennes. Les études de populations précédentes sur les effets sur la santé du bruit des éoliennes reposaient presque entièrement sur les états de santé autodéclarés par des répondants de sondages. Selon les résultats préliminaires de l'étude de Santé Canada, des différences apparaîtraient entre les deux provinces examinées au regard de la prévalence du dérangement autodéclaré. Par conséquent, des différences régionales relatives à la prévalence des effets sont certainement possibles, en raison de différences de perception des éoliennes ou d'autres facteurs pour le moment indéterminés qui influenceraient la sensibilité individuelle. Les résultats soumis à l'évaluation des pairs de l'étude de Santé Canada n'étaient pas disponibles avant que soit entrepris le processus d'édition du rapport du comité d'experts.

D'autres pays, comme l'Australie, ont mis sur pied des systèmes de déclaration pour recueillir de manière cohérente les plaintes liées au bruit et à la santé, lesquels ont permis de réaliser des analyses systématiques des plaintes se rapportant aux éoliennes. Les plaintes de ce type ne sont, au mieux, qu'un médiocre substitut aux états de santé autodéclarés. La seule analyse comparable de plaintes au Canada a été réalisée en Alberta. Elle n'a relevé globalement que

de faibles niveaux de plaintes, alors que des poches de hauts niveaux de plaintes ont été recensées en Australie. Toutefois, ce constat peut être attribuable au fait que l'industrie éolienne au Canada est relativement jeune en comparaison avec celle d'autres pays.

Quelles technologies ou pratiques exemplaires utilisées dans d'autres pays pourraient être envisagées au Canada afin de diminuer les réactions négatives de la population au bruit des éoliennes?

Le comité a relevé trois domaines actuels de développement technologique qui semblent les plus prometteurs pour réduire le niveau de bruit des éoliennes commerciales modernes : l'optimisation des systèmes de commande de l'angle de calage des pales, la modification des pales (dentelures ou peignes) et les technologies utilisées pour réduire le régime des éoliennes dans les conditions qui génèrent trop de bruit. Chacune de ces avenues permettrait de diminuer le niveau de bruit tout en limitant au minimum la perte de puissance de sortie, c'est-à-dire de trouver un juste équilibre entre les impacts environnementaux et les retombées économiques. Quelle que soit la viabilité de ces technologies particulières, la recherche-développement a généré un flux constant d'améliorations qui ont continuellement mené à des réductions du niveau de bruit produit pour une éolienne d'une taille donnée. Cette amélioration technologique constante devrait engendrer d'autres réductions du bruit produit par les éoliennes.

Aucune technologie « miracle », cependant, ne résoudra tous les problèmes de bruit associés aux éoliennes, encore moins à brève échéance. Par conséquent, d'autres mesures demeureront pertinentes.

Les éoliennes sont vendues sur un marché mondial et la réglementation d'un seul pays comme le Canada n'est pas susceptible de constituer une incitation suffisante pour réduire davantage leur puissance sonore. Toutefois, la tendance dans l'industrie mondiale de l'énergie éolienne est de réduire continuellement les niveaux sonores des éoliennes afin d'accroître leur acceptabilité sociale sur tous les marchés. De plus, les mesures réglementaires prises par un territoire particulier (pays, province) détermineront quelles technologies et pratiques peuvent être utilisées pour atteindre les objectifs locaux.

La réglementation constitue donc un outil important pour limiter l'exposition au bruit des éoliennes et, par conséquent, ses effets potentiels sur la santé publique. Le comité d'experts a examiné les pratiques exemplaires utilisées pour mesurer

de manière plus précise le bruit de fond, le bruit à l'intérieur, le bruit nocturne et la modulation d'amplitude. Le comité soutient qu'une combinaison de ces pratiques permettrait d'acquérir une meilleure compréhension de l'exposition au bruit et d'éclairer les lignes directrices ou la réglementation des divers ordres de gouvernement (fédéral, provincial et municipal) s'appliquant au bruit.

Finalement, le comité d'experts a examiné les meilleures pratiques en matière d'évaluation de l'impact et d'engagement communautaire. Par le passé, l'omission de consulter la collectivité n'a fait qu'exacerber les attitudes négatives du public à l'égard des projets éoliens et de l'industrie éolienne. En revanche, l'évaluation des effets sur la santé et sur l'environnement, et les activités d'engagement communautaire menées dès le début et pendant le cycle complet des projets, y compris après l'installation des éoliennes, permettent aux intervenants de s'adapter aux commentaires et aux préoccupations du public.

9.1 RÉFLEXIONS FINALES

Les éoliennes sont devenues une source d'énergie controversée au Canada comme ailleurs dans le monde. Bien que certains les acclament comme constituant une source d'énergie renouvelable et propre, d'autres ont soulevé des préoccupations concernant les incidences indésirables qu'elles peuvent avoir sur l'environnement et sur la santé humaine. Évaluer les effets possibles sur la santé humaine d'une exposition au bruit des éoliennes pose plusieurs défis scientifiques et techniques.

Cette évaluation a recensé suffisamment de preuves que l'exposition au bruit des éoliennes (possiblement en combinaison avec d'autres facteurs) peut contribuer à un dérangement, mais qu'une telle exposition n'entraîne pas une perte auditive. Par contre, les preuves trouvées étaient insuffisantes pour conclure en l'absence ou en la présence d'un lien de causalité entre le bruit des éoliennes et plusieurs autres états de santé.

Le comité d'experts souligne qu'étant donné la nature du son produit par les éoliennes et la qualité limitée des données disponibles (petite taille des échantillons, petit nombre d'études disponibles, manque de mesures exhaustives de l'exposition au bruit), les effets sur la santé du bruit des éoliennes ne peuvent être entièrement évalués à ce moment-ci. De plus, reconnaissant les défis que posent les recherches sur les effets sur la santé modulés par de multiples facteurs (vastes études de cohortes, études longitudinales, expériences à double insu), le comité d'experts signale que pour recueillir des preuves de qualité, il faudrait consentir des efforts de recherche très substantiels.

Glossaire

Glossaire

Association, ou lien : décrit une relation entre deux variables qui les rend statistiquement dépendantes. Une association, ou un lien, n'implique pas nécessairement qu'une des deux variables soit la cause de l'autre, puisque l'association peut être attribuable à une autre variable, inconnue celle-là; il peut également y avoir incertitude à savoir quelle variable a un effet sur l'autre.

Biais de sélection : un biais statistique pouvant découler de la méthode utilisée pour choisir les sujets d'une étude; lorsqu'un biais de sélection n'est pas corrigé pendant l'analyse, il peut donner lieu à des conclusions erronées. On peut citer comme exemples de biais de sélection l'autosélection de sujets ou la sélection non aléatoire de sujets pour une étude. Dans ces cas, les sujets peuvent présenter des caractéristiques différentes de celles des personnes non choisies (l'âge et le revenu sont des exemples fréquents de telles différences), lesquelles peuvent influencer les résultats de l'étude. Un autre type de biais est le biais d'attrition, où les sujets qui abandonnent une étude peuvent présenter une certaine particularité : ils pourraient, par exemple, subir des effets plus intenses que la moyenne des sujets choisis, lesquels ne seront pas pris en compte dans l'analyse.

Bruit : deux définitions différentes du bruit sont utilisées dans ce rapport : une définition technique et une définition qui décrit la perception d'un son par une personne. Dans le domaine de l'acoustique, un bruit est un signal acoustique concurrent qui masque un son présentant un intérêt. Le terme *bruit* désigne aussi un son désagréable ou indésirable qui est cause de perturbation. Le fait de percevoir un son comme un bruit dépend de la personne et du contexte (c.-à-d., le même son peut être considéré comme un bruit par une personne, mais pas par une autre).

Bruyance, ou sonie : la perception subjective d'un son ou l'ampleur de la sensation éprouvée lorsqu'un son affecte l'oreille. Par opposition, la *pression acoustique*, est une mesure objective de l'énergie propagée par une onde sonore. Le *son* et le *bruit* sont souvent mesurés d'après le niveau de pression acoustique, mais cette caractéristique n'est pas toujours un indicateur fiable de la bruyance — la façon dont le son est perçu par une personne — puisque la bruyance tient non seulement de la pression acoustique, mais aussi de facteurs physiologiques et psychologiques.

Conduction aérienne du son : la transmission du son à travers le canal auditif externe et l'oreille moyenne jusqu'à l'oreille interne [traduction] (Dorland, 2011).

Conduction osseuse du son : la transmission du son à travers jusqu'à l'oreille interne à travers les os du crâne [traduction] (Dorland, 2011).

dB(A), dB(C), dB(G) : désignent tous des mesures du niveau de pression acoustique ajustées en fonction d'un filtre de pondération, indiqué par la lettre entre parenthèses suivant « dB » (décibel). Par exemple, « dB(A) » ou « dBA » indique un niveau de pression acoustique pondéré A. Cette pondération réduit l'importance des sons de basse et de très haute fréquence de façon à reproduire approximativement la sensibilité de l'oreille humaine aux sons de faibles niveaux de pression acoustique [traduction] (Leventhall, 2011). La pondération C réduit moins l'importance des sons de basse fréquence que la pondération A, alors que la pondération G met davantage en relief les infrasons que les autres fréquences. Voir la section 3.1.1 pour une description plus détaillée des mesures sonores et des filtres de pondération.

Définition de cas : un « ensemble de critères normalisés utilisés pour déterminer si une personne est atteinte d'une maladie ou d'un état de santé en particulier » [traduction] (Université Columbia, s.d.).

Déhiscence du canal supérieur : un état de santé résultant de l'érosion de la coque osseuse qui couvre le canal supérieur du système vestibulaire. Elle peut permettre une communication entre le canal supérieur et la cavité crânienne, ce qui peut engendrer une perte d'audition par conduction aérienne des fréquences basses et moyennes (≤ 2 000 Hz); dans certains cas, elle peut aussi hausser le seuil d'audition par conduction osseuse, ce qui peut accroître la sensibilité au son.

Éloignement : en aménagement du territoire, la distance qui sépare un bâtiment ou une structure de tout endroit contre lequel une protection est jugée nécessaire; dans le cas des éoliennes, il s'agit de la distance d'éloignement de la construction ou résidence la plus proche. L'éloignement est souvent utilisé pour limiter l'exposition au bruit et aux autres risques posés par les éoliennes.

Éolienne : dans ce rapport, désigne un dispositif moderne à échelle commerciale, ou utilitaire, qui produit de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent. Elle comprend habituellement trois pales, chacune mesurant approximativement 40 mètres de longueur ou plus, lesquelles sont fixées à un rotor et à une nacelle horizontale, montés sur une tour d'une hauteur approximative de 80 mètres ou plus. Les pales tournent généralement sur le devant (côté amont) de la tour. Ce rapport porte principalement sur les éoliennes terrestres qui sont reliées à un réseau électrique; les éoliennes marines ou celles de plus petite dimension qui ne fournissent de l'électricité qu'à une seule structure dépassent la portée de ce rapport.

Épidémiologie : étude des facteurs influant sur les états de santé observés au sein de diverses populations ainsi que sur la répartition des états observés.

Exposition : le fait d'être soumis à quelque chose (par exemple, du son) qui pourrait avoir un effet néfaste. Dans le présent rapport, le type d'exposition est toujours mentionné (par exemple, l'exposition au bruit des éoliennes).

Fréquence : la fréquence d'un son, mesurée en Hertz (Hz), est le nombre d'ondes de pression par seconde. La fréquence est perçue comme une tonalité ou une hauteur, les fréquences plus hautes sonnant plus aiguës : le do central a une fréquence de 261,6 Hz. L'oreille humaine est plus sensible aux fréquences situées entre 2 kHz et 5 kHz, ce qui correspond grossièrement au registre de l'octave la plus aiguë d'un piano. Un son qui ne comprend qu'une seule fréquence s'appelle un son pur, alors qu'un son composé d'une large gamme de fréquences se désigne un son *à large bande*.

Infrason : un son dont la fréquence est inférieure à 20 Hz; lorsqu'il est question d'effets physiologiques, une limite plus basse, celle de 1 Hz, est souvent utilisée (ANSI/ASA S1.1, 2013). Les infrasons sont audibles à des niveaux de pression acoustique élevés, ordinairement au-dessus d'un niveau de 70 à 100 dB, le seuil d'audition s'élevant à mesure que la fréquence baisse (Watanabe et Møller, 1990).

Large bande : voir *Fréquence*.

Limite de bruit : niveau de pression acoustique maximal (à la source) ou niveau de pression acoustique (à l'endroit d'un récepteur) recommandé ou établi en vertu d'un règlement pour empêcher des problèmes liés au bruit de se produire dans un milieu donné.

Modulation d'amplitude : désigne un changement de pression acoustique dans le temps. Elle possède deux caractéristiques : la différence entre le niveau de pression acoustique le plus élevé et le niveau le plus bas (profondeur de la modulation) et la plage de fréquences dans laquelle les variations de pression acoustique se produisent (modulation de fréquence, à ne pas confondre avec la fréquence du son elle-même) [traduction] (van den Berg et Bowdler, 2011). La modulation d'amplitude peut aussi être périodique, c'est-à-dire que les changements de pression acoustique surviennent à des intervalles réguliers. Dans le cas du bruit des éoliennes, l'amplitude est modulée suivant la vitesse de rotation des pales (la « fréquence de passage des pales »).

Niveau de pression acoustique (niveau sonore; pression acoustique; NPA; L_p) : la mesure objective de l'amplitude d'un son : l'ampleur des fluctuations de pression autour de la pression atmosphérique. La valeur à un endroit donné dépend des caractéristiques de la source et de la transmission du son entre la source et le récepteur, où le niveau de pression acoustique est mesuré. Les niveaux de pression acoustique sont mesurés en décibels (dB), qui représentent l'ampleur des fluctuations de pression en Pascals (Pa), par rapport à une valeur de référence, sur une échelle logarithmique. Le niveau de référence (0 dB) pour la pression acoustique est de 20 µPa (2×10^{-5} Pa), qui est approximativement le seuil d'audition de l'oreille humaine à une fréquence de 1 kHz.

Niveau de puissance acoustique (L_W) : la puissance sonore produite à la source, par opposition au *niveau de pression acoustique*, qui est mesuré au point où se trouve un récepteur. Les deux sont mesurés en décibels (dB), qui représentent la puissance relative à une valeur de référence, sur une échelle logarithmique. Le niveau de référence (0 dB) pour la puissance acoustique est de 1×10^{-12} W. La puissance acoustique est une caractéristique de la source, utilisée pour estimer la propagation d'un son dans un milieu donné (Crocker, 2007; Leventhall, 2011).

Parc d'énergie éolienne : consiste en un groupe d'éoliennes installé dans une zone géographique déterminée. Le parc est détenu et exploité dans le but de produire de l'électricité à l'échelle commerciale et est relié au principal réseau électrique.

Période de latence : la période entre l'exposition et l'apparition d'une maladie.

Puissance nominale : la capacité maximale de production électrique d'un aérogénérateur.

Récepteur : l'endroit où un son est mesuré ou détecté. Le terme *récepteur* peut aussi désigner un appareil enregistreur utilisé pour mesurer un son ou une personne exposée à un son à un endroit donné. Un récepteur est souvent exposé à du son provenant de plusieurs sources dans son environnement, bien qu'une de ces sources (par exemple, une ou plusieurs éoliennes) présente un intérêt particulier.

Santé : un « état de bien-être physique, mental et social complet et non simplement l'absence de maladie ou d'infirmité » (OMS, 1946).

Seuil d'audition absolu : le niveau de pression acoustique le plus bas auquel une personne peut entendre différentes fréquences dans un environnement très silencieux dans un état d'écoute attentive.

Seuil d'audition avec effet de masque : le niveau de pression acoustique auquel un son peut être entendu en présence de signaux sonores concurrents.

Son : l'onde (oscillation) de pression qui se propage à travers un médium tel que l'air (ANSI/ASA S1.1, 2013). Le terme *son* peut aussi désigner une sensation auditive suscitée par l'onde de pression.

Son de basse fréquence : dans ce rapport, désigne un son dont la ou les fréquences se situent dans une bande située entre 20 et 200 Hz (Persson Waye, 2005, 2011; Pedersen *et al.*, 2007b). Les frontières entre les infrasons, les sons de basse fréquence et les autres fréquences sont quelque peu arbitraires, cependant, et varient dans la littérature selon le contexte et l'application.

Stress : ensemble de facteurs de nature physique, biologique ou psychologique qui poussent une personne tout près ou au-delà de sa capacité d'adaptation (Welford, 1974 Gemmert et Van Galen, 1997).

Vitesse cotée du vent : la vitesse la plus basse à laquelle une éolienne fonctionnera à puissance maximale (puissance nominale).

Vitesse d'éclipsage : la vitesse maximale du vent à laquelle une éolienne produit de l'électricité.

Vitesse de fourniture : la vitesse minimale du vent à laquelle une éolienne produit de l'électricité.

Références

Références

Alimohammadi *et al.*, 2013 – Alimohammadi, I., S. Sandrock et M. R. Gohari. « The effects of low frequency noise on mental performance and annoyance », *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 185, p. 7043-7051.

Alves-Pereira et Branco, 2007 – Alves-Pereira, M. et N. A. A. C. Branco. « Vibroacoustic disease: Biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling », *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 93, p. 256-279.

Ambrose *et al.*, 2012 – Ambrose, S. E., R. W. Rand et C. M. E. Krogh. « Wind turbine acoustic investigation: Infrasound and low-frequency noise—A case study », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 32, p. 128-141.

ANSI/ASA S1.1, 2013 – The American National Standards Institute/The Acoustical Society of America. *Acoustical Terminology*, Melville, NY, The American National Standards Institute, Inc. Accredited Standards Committee S1, Acoustics.

ASHA, 1981 – American Speech-Language-Hearing Association. *Degree of Hearing Loss*. Adresse : http://www.asha.org/public/hearing/Degree-of-Hearing-Loss/ (dernière consultation : novembre 2014).

ASPC, 2008 – Agence de la santé publique du Canada. *Histoire*. Adresse : http://www.phac-aspc.gc.ca/about_apropos/history-fra.php (dernière consultation : septembre 2014).

ASPC, 2009 – Agence de la santé publique du Canada. *2009 Suivi des maladies du coeur et des accidents vasculaires cérébraux au Canada*. Adresse : http://www.phac-aspc.gc.ca/publicat/2009/cvd-avc/report-rapport-fra.php (dernière consultation : novembre 2014).

AUC, 2013 – Alberta Utilities Commission. *Rule 12: Noise Control*, Calgary, AB, AUC.

Babisch, 2002 – Babisch, W. « The noise/stress concept, risk assessment and research needs », *Noise & Health*, vol. 4, n°16, p. 1-11.

Babisch, 2008 – Babisch, W. « Road traffic noise and cardiovascular risk », *Noise & Health*, vol. 10, n°38, p. 27-33.

Babisch, 2011 – Babisch, W. « Cardiovascular effects of noise », *Noise & Health*, vol. 13, n°52, p. 201.

Babisch *et al.*, 2003 – Babisch, W., H. Ising et J. E. J. Gallacher. « Health status as a potential effect modifier of the relation between noise annoyance and incidence of ischaemic heart disease. », *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 60, n°10, p. 739-745.

Babisch *et al.*, 2013 – Babisch, W., G. Pershagen, J. Selander, D. Houthuijs, O. Breugelmans, E. Cadum,…A. L. Hansell. « Noise annoyance—A modifier of the association between noise level and cardiovascular health? », *Science of the Total Environment*, vol. 452-453, n°C, p. 50-57.

Baguley, 2003 – Baguley, D. M. « Hyperacusis », *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 96, n°12, p. 582-585.

Bakker *et al.*, 2012 – Bakker, R. H., E. Pedersen, G. P. van den Berg, R. E. Stewart, W. Lok et J. Bouma. « Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress », *Science of the Total Environment*, vol. 425, p. 42-51.

Baqtasch *et al.*, 2006 – Baqtasch, M., J. Van Dam, B. Søndergaard et A. Rogers. « Wind turbine noise—An overview », *Canadian Acoustics*, vol. 34, n°2, p. 7-15.

Barone, 2011 – Barone, M. *Survey of Techniques for Reduction of Wind Turbine Blade Trailing Edge Noise*, Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories, operated for the United States Department of Energy by Sandia Corporation.

Barregard *et al.*, 2009 – Barregard, L., E. Bonde et E. Öhrström. « Risk of hypertension from exposure to road traffic noise in a population-based sample. », *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 66, n°6, p. 410-415.

Basner *et al.*, 2011 – Basner, M., U. Müller et E. M. Elmenhorst. « Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation », *Sleep*, vol. 34, n°1, p. 11-23.

Basner *et al.*, 2014 – Basner, M., W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen et S. Stansfeld. « Auditory and non-auditory effects of noise on health », *The Lancet*, vol. 383, n°9925, p. 1325-1332.

Bauer, s.d. – Bauer, L. *Welcome to wind-turbine-models.com*. Adresse : http://en.wind-turbine-models.com/ (dernière consultation : juin 2014).

Berger *et al.*, 2003 – Berger, E. H., R. W. Kieper et D. Gauger. « Hearing protection: Surpassing the limits to attenuation imposed by the bone-conduction pathways », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, n°4, p. 1955-1967.

Berglund *et al.*, 1996 – Berglund, B., P. Hassmén et R. S. Job. « Sources and effects of low-frequency noise », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, p. 2985-3002.

Bockstael *et al.*, 2012 – Bockstael, A., L. Dekoninck, A. Can, D. Oldoni, B. De Coensel et D. Botteldooren. « Reduction of wind turbine noise annoyance: An operational approach », *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 98, p. 392-401.

Bockstael *et al.*, 2013 – Bockstael, A., T. Van Renterghem, V. De Weirt et D. Botteldooren. *Exploring Underlying Mechanisms for Human Response to Wind Turbine Noise*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

Bolin *et al.*, 2011 – Bolin, K., G. Bluhm, G. Eriksson et M. E. Nilsson. « Infrasound and low frequency noise from wind turbines: Exposure and health effects », *Environmental Research Letters*, vol. 6, n°3, p. 1-6.

Bolin *et al.*, 2012 – Bolin, K., A. Kedhammar et M. E. Nilsson. « The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise », *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 98, n°5, p. 741-748.

Bowdler, 2008 – Bowdler, D. « Amplitude modulation of wind turbine noise. A review of the evidence », *Institute of Acoustics Bulletin*, vol. 33, n°4, p. 1-9.

Bradford Hill, 1965 – Bradford Hill, A. « The environment and disease: Association or causation? », *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, vol. 58, p. 295-300.

Bradley, 1994 – Bradley, J. S. « Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble », *Noise Control Engineering Journal*, vol. 42, n°6, p. 203-208.

Brisson *et al.*, 2013 – Brisson, G., M.-C. Gervais, R. Martin, D. Blackburn, M. Chagnon, K. Martel,…I. Tardiff. *Éoliennes et Santé Publique: Synthèse des Connaissances – Mise à Jour*, Québec, QC, Institut national de Santé Publique du Québec, Direction de la santé environnementale et de la toxicologie.

Broadbent, 1971 – Broadbent, D. E. *Decision and Stress*. Londres, Royaume-Uni, Academic Press Inc.

Bryant et Bradley, 1985 – Bryant, P. et L. Bradley. *Children's Reading Problems: Psychology and Education*. Oxford, Royaume-Uni, Wiley-Blackwell.

Bullmore, 2011 – Bullmore, A. « Chapter 3. Sound Propagation from Wind Turbines », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

Burton *et al.*, 2011 – Burton, T., N. Jenkins, D. Sharpe et E. Bossanyi. « Wind Turbine Installations and Wind Farms », dans, Burton, T., N. Jenkins, D. Sharpe et E. Bossanyi (réd.), *Wind Energy Handbook*, 2e éd., West Sussex, Royaume-Uni, John Wiley & Sons, Ltd.

CanWEA, 2008 – Association canadienne de l'énergie éolienne. *Wind Vision 2025: Summary*, Ottawa, ON, CanWEA.

CanWEA, 2011 – Association canadienne de l'énergie éolienne. *Federal / Provincial Initiatives on Wind Energy*, Ottawa, ON, CanWEA.

CanWEA, 2014 – Association canadienne de l'énergie éolienne. *L'éolien : une solution viable*. Adresse : http://leolien-lesfaits.ca/eolien-une-solution-viable (dernière consultation : janvier 2015).

CanWEA, s.d. – Association canadienne de l'énergie éolienne. *Pratiques d'excellence en matière d'engagement communautaire et de consultation publique*, Ottawa, ON, CanWEA.

Chapman *et al.*, 2013 – Chapman, S., A. St George, K. Waller et V. Cakic. « The pattern of complaints about Australian wind farms does not match the establishment and distribution of turbines: Support for the psychogenic, 'communicated disease' hypothesis », *PLOS ONE*, vol. 8, n°10, p. e76584.

Ciliska *et al.*, 2008 – Ciliska, D., H. Thomas et C. Buffett. *Introduction à la santé publique fondée sur des données probantes et Recueil d'outils d'évaluation critique pour la pratique en santé publique*, Hamilton, ON, Centre de collaboration nationale des méthodes et outils.

CIRC, 2006 – Centre international de recherche sur le cancer, Organisation mondiale de la Santé. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Preamble*, Lyon, France, CIRC.

Clark et Stansfeld, 2007 – Clark, C. et S. A. Stansfeld. « The effect of transportation noise on health and cognitive development: A review of recent evidence », *International Journal of Comparative Psychology*, vol. 20, n°2.

Clark et Sörqvist, 2012 – Clark, C. et P. Sörqvist. « A 3 year update on the influence of noise on performance and behavior », *Noise & Health*, vol. 14, n°61, p. 292-296.

Colby *et al.*, 2009 – Colby, W. D., R. Dobie, G. Leventhall, D. M. Lipscomb, R. J. McCunney, M. T. Seilo et B. Søndergaard. *Wind Turbine Sound and Health Effects: An Expert Panel Review (AWEA and CWEA)*, Ottawa, ON, Association canadienne de l'énergie éolienne.

Colebatch et Halmagyi, 1992 – Colebatch, J. G. et G. M. Halmagyi. « Vestibular evoked potentials in human neck muscles before and after unilateral vestibular deafferentation », *Neurology*, vol. 42, n°8, p. 1635-1636.

Colebatch *et al.*, 1994 – Colebatch, J. G., G. M. Halmagyi et N. F. Skuse. « Myogenic potentials generated by a click-evoked vestibulocollic reflex », *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, vol. 57, n°2, p. 190-197.

Columbia University, s.d. – Columbia University. *Glossary of epidemiological terms*. Adresse : http://www.cs.columbia.edu/digigov/LEXING/CDCEPI/gloss.html (dernière consultation : janvier 2015).

CoM, 2014 – Commonwealth of Massachusetts. *MassDEP Wind Turbine Noise Technical Advisory Group*. Adresse : http://www.mass.gov/eea/agencies/massdep/news/advisory-committees/wntag.html (dernière consultation : octobre 2014).

Crichton *et al.*, 2014a – Crichton, F., G. Dodd, G. Schmid, G. Gamble, T. Cundy et K. J. Petrie. « The power of positive and negative expectations to influence reported symptoms and mood during exposure to wind farm sound », *Health Psychology*, vol. 33, n°12, p. 1588-1592.

Crichton *et al.*, 2014b – Crichton, F., G. Dodd, G. Schmid, G. Gamble et K. J. Petrie. « Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines? », *Health Psychology*, vol. 33, n°4, p. 360-364.

Crocker, 2007 – Crocker, M. J. *Handbook of Noise and Vibration Control*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.

Croy *et al.*, 2013 – Croy, I., M. G. Smith et K. P. Waye. « Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: An experimental study », *BMJ Open*, vol. 3, p. 1-8.

CSE, 2009 – Centre for Sustainable Energy. *Delivering Community Benefits from Wind Energy Development: A Toolkit*, Londres, Royaume-Uni, CSE.

Curthoys *et al.*, 2006 – Curthoys, I. S., J. Kim, S. K. McPhedran et A. J. Camp. « Bone conducted vibration selectively activates irregular primary otolithic vestibular neurons in the guinea pig », *Experimental Brain Research*, vol. 175, n°2, p. 256-267.

Danielsson et Landstrom, 1985 – Danielsson, A. et U. Landstrom. « Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study », *Acta Medica Scandinavica*, vol. 217, n°5, p. 531-535.

DEHLG, 2006 – Department of Environment, Heritage and Local Government. *Wind Energy Developement*, Dublin, Irlande, DEHLG.

Diamond, 2002 – Diamond, A. « Normal Development of Prefrontal Cortex from Birth to Young Adulthood: Cognitive Functions, Anatomy, and Biochemistry », dans, Stuss, D. T. et R. T. Knight (réd.), *Principles of Frontal Lobe Function*, New York, NY, Oxford University Press.

DME, 2011 – Danish Ministry of the Environment. *Statutory Order on Noise from Wind Turbines*, Copenhague, Danemark, DME.

Dorland, 2011 – Dorland, W. A. N. *Dorland's Illustrated Medical Dictionary*. 32e éd. Philadelphie, PA, Elsevier Health Sciences.

Eberhardt *et al.*, 1987 – Eberhardt, J. L., L. O. Stråle et M. H. Berlin. « The influence of continuous and intermittent traffic noise on sleep », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 116, n°3, p. 445-464.

Eggermont, 2005 – Eggermont, J. J. « Tinnitus: Neurobiological substrates », *Drug Discovery Today*, vol. 10, n°19, p. 1283-1290.

Ellenbogen *et al.*, 2012 – Ellenbogen, J. M., S. Grace, W. J. Heiger-Bernays, J. F. Manwell, D. A. Mills, K. A. Sullivan et M. G. Weisskopf. *Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel*, Boston, MA, Prepared for Massachusetts Department of Environmental Protection, Massachusetts Department of Public Health.

EPA, 2003 – United States Environmental Protection Agency. *A Summary of General Assessment Factors for Evaluating the Quality of Scientific and Technical Information*, Washington, DC, U.S. EPA.

EPA, 2011 – Ireland Environmental Protection Agency. *Guidance Note on Noise Assessment of Wind Turbine Operations at EPA Licensed Sites (NG3)*, Wexford, Ireland, EPA Ireland.

EPHC, 2010 – Environment Protection and Heritage Council. *National Wind Farm Development Guidelines Draft*, Adélaïde, Australie, EPHC.

Erdogan *et al.*, 2011 – Erdogan, N., M. Songu, E. Akay, B. D. Mete, E. Uluc, L. K. Ona et O. Oyar. « Posterior semicircular canal dehiscence in asymptomatic ears », *Acta Oto-Laryngologica* vol. 131, n°1, p. 4-8.

Eriksson *et al.*, 2014 – Eriksson, C., A. Hilding, A. Pyko, G. Bluhm, G. Pershagen et C.-G. Östenson. « Long-term aircraft noise exposure and body mass index, waist circumference, and type 2 diabetes: A prospective study », *Environmental Health Perspectives*, vol. 122, n°7, p. 693.

Evans et Cooper, 2012 – Evans, T. et J. Cooper. « Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms », *Acoustics Australia*, vol. 40, n°1, p. 28-36.

Evans et Maxwell, 1997 – Evans, G. W. et L. Maxwell. « Chronic noise exposure and reading deficits: The mediating effects of language acquisition », *Environment and Behavior*, vol. 29, n°5, p. 638-656.

Evans *et al.*, 1995 – Evans, G. W., S. Hygge et M. Bullinger. « Chronic noise and psychological stress », *Psychological Science*, vol. 6, n°6, p. 333-338.

Evans *et al.*, 1998 – Evans, G. W., M. Bullinger et S. Hygge. « Chronic noise exposure and physiological response: A prospective study of children living under environmental stress », *Psychological Science*, vol. 9, n°1, p. 75-77.

EWEA, 2005 – European Wind Energy Association. *Prioritising Wind Energy Research: Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector*, Bruxelles, Belgique, EWEA.

Fastl et Menzel, 2013 – Fastl, H. et D. Menzel. *Psychoacoustic Aspects of Noise from Wind Turbines*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

Ferguson-Martin et Hill, 2011 – Ferguson-Martin, C. J. et S. D. Hill. « Accounting for variation in wind deployment between Canadian provinces », *Energy Policy*, vol. 39, n°3, p. 1647-1658.

Findeis et Peters, 2004 – Findeis, H. et E. Peters. « Disturbing effects of low frequency sound immissions and vibrations in residential buildings », *Noise & Health*, vol. 6, n°23, p. 29-35.

Fortin *et al.*, 2013 – Fortin, P., K. Rideout, R. Copes et C. Bos. *Éoliennes et santé*, Vancouver, BC, Centre de collaboration nationale en santé environnementale.

Frey et Hadden, 2012 – Frey, B. J. et P. J. Hadden. *Wind Turbines and Proximity to Homes: The Impact of Wind Turbine Noise on Health.*

Fruhstorfer *et al.*, 1985 – Fruhstorfer, B., H. Fruhstorfer, P. Grass, H. G. Milerski, G. Sturm, W. Wesemann et D. Wiesel. « Daytime noise stress and subsequent night sleep: Interference with sleep patterns, endocrine and neurocrine functions », *International Journal of Neuroscience*, vol. 26, n°3-4, p. 301-310.

GC, 2004 – Gouvernement du Canada. *Loi sur les dispositifs émettant des radiations. L.R.C. (1985), ch. R-1.* Adresse : http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/R-1/page-1.html (dernière consultation : novembre 2014).

GE, 2004 – General Electric Company. *1.5sle/1.5sl/1.5s/1.5se Wind Turbines*, Amsterdam, Pays-Bas, General Electric.

GreyNet International, 2014 – GreyNet International. *Grey Literature Network Service.* Adresse : http://www.greynet.org/home/aboutgreynet.html (dernière consultation : septembre 2014).

Griefahn, 2002 – Griefahn, B. « Sleep disturbances related to environmental noise », *Noise & Health*, vol. 4, n°15, p. 57-60.

GWEC, 2014 – Global Wind Energy Council. *Global Wind Report: Annual Market Update 2013*, Bruxelles, Belgique, GWEC.

Hagiwara *et al.*, 2012 – Hagiwara, M., J. A. Shaikh, Y. Fang, G. Fatterpekar et P. C. Roehm. « Prevalence of radiographic semicircular canal dehiscence in very young children: An evaluation using high-resolution computed tomography of the temporal bones », *Pediatric Radiology* vol. 42, n°12, p. 1456-1464.

Haines *et al.*, 2001 – Haines, M. M., S. A. Stansfeld, R. S. Job, B. Berglund et J. Head. « Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children », *Psychological Medicine*, vol. 31, n°2, p. 265-277.

Hansen et Stinson, 1998 – Hansen, M. O. et M. R. Stinson. « Air conducted and body conducted sound produced by own voice », *Canadian Acoustics*, vol. 26, n°2, p. 11-19.

Hardoy *et al.*, 2005 – Hardoy, M. C., M. G. Carta, A. R. Marci, F. Carbone, M. Cadeddu, V. Kovess,…B. Carpiniello. « Exposure to aircraft noise and risk of psychiatric disorders: The Elmas survey—aircraft noise and psychiatric disorders », *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, vol. 40, n°1, p. 24-26.

Harrison, 2014 – Harrison, R. V. « On the biological plausibility of wind turbine syndrome », *International Journal of Environmental Health Research*, vol. 8, p. 1-6.

Hau, 2006 – Hau, E. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics.* 2e éd. New York, NY, Springer.

Haugen, 2011 – Haugen, K. M. B. *International Review of Policies and Recommendations for Wind Turbine Setbacks from Residences: Setbacks, Noise, Shadow Flicker, and Other Concerns,* Saint Paul, MN, Minnesota Department of Commerce: Energy Facility Permitting.

HCN, 1994 – Health Council of the Netherlands. *Committee Noise and Health: Noise and Health*, La Haye, Pays-Bas, HCN.

Henry *et al.*, 2005 – Henry, J. A., K. C. Dennis et M. A. Schechter. « General review of tinnitus: Prevalence, mechanisms, effects, and management », *Journal of Speech, Language & Hearing Research*, vol. 48, n°5, p. 1204-1235.

Hensel *et al.*, 2007 – Hensel, J., G. Scholz, U. Hurttig, D. Mrowinski et T. Janssen. « Impact of infrasound on the human cochlea », *Hearing Research*, vol. 233, n°1, p. 67-76.

Hepburn, 2006 – Hepburn, H. G. « Acoustic and geophysical measurement of infrasound from wind farm turbines », *Canadian Acoustics*, vol. 34, n°2, p. 51.

Hessler, 2011 – Hessler, D. « Chapter 7. Measuring and Analyzing Wind Turbine Noise », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

HGC Engineering, 2010 – HGC Engineering. *Low Frequency Noise and Infrasound Associated with Wind Turbine Generator Systems: A Literature Review*, Toronto, ON, Ministère de l'Environnement de l'Ontario.

Hockey, 1984 – Hockey, G. R. J. « Varieties of Attentional State: The Effects of Environment », dans, Parasuraman, R. et D. R. Davies (réd.), *Varieties of Attention*, New York, NY, Academic Press.

Hodgetts et O'Connor, 2013 – Hodgetts, M. et K. O'Connor. *Wind Turbines and Health: Summary of a Scoping Review*, Kingston, ON, Research and Evaluation Division of Kingston, Frontenac and Lennox & Addington Public Health.

Howick *et al.*, 2009 – Howick, J., P. Glasziou et J. K. Aronson. « The evolution of evidence hierarchies: What can Bradford Hill's 'guidelines for causation' contribute? », *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 102, n°5, p. 186-194.

Hubbard, 1982 – Hubbard, H. H. « Noise induced house vibrations and human perception », *Noise Control Engineering Journal*, vol. 19, n°2, p. 49-55.

Hughes et Jones, 2001 – Hughes, R. et D. M. Jones. « The intrusiveness of sound: Laboratory findings and their implications for noise abatement », *Noise & Health*, vol. 4, n°13, p. 51-70.

Ising *et al.*, 1999 – Ising, H., W. Babisch et B. Kruppa. « Noise-induced endocrine effects and cardiovascular risk », *Noise & Health*, vol. 1, n°4, p. 37-48.

Jakobsen, 2001 – Jakobsen, J. « Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration », *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 20, n°3, p. 141-148.

Jakobsen, 2005 – Jakobsen, J. « Infrasound emission from wind turbines », *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 24, n°3, p. 145-155.

Jami et Walsh, 2014 – Jami, A. A. N. et P. R. Walsh. « The role of public participation in identifying stakeholder synergies in wind power project development: The case study of Ontario, Canada », *Renewable Energy*, vol. 68, p. 194-202.

Janssen *et al.*, 2011 – Janssen, S. A., H. Vos, A. R. Eisses et E. Pedersen. « 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*, vol. 130, p. 3746-3753.

Jeffery *et al.*, 2013 – Jeffery, R. D., C. Krogh et B. Horner. « Adverse health effects of industrial wind turbines », *Canadian Family Physician*, vol. 59, p. 473-475.

Kaliski, 2014 – Kaliski, K. *Wind Turbine Research Study Interim Modeling Report for WNTAG*, White River Junction, VT, RSG, Inc.

Kalveram *et al.*, 1999 – Kalveram, K. T., J. Dassow et J. Vogt. « How information about the source influences noise annoyance », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, p. 942.

Kantarelis et Walker, 1988 – Kantarelis, C. et J. Walker. « The identification and subjective effect of amplitude modulation in diesel engine exhaust noise », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 120, n°2, p. 297-3032.

Kåsin *et al.*, 2012 – Kåsin, J. I., T. O. Kjellevand, J. Kjekshus, G. B. Nesheim et A. Wagstaff. « CT examination of the pericardium and lungs in helicopter pilots exposed to vibration and noise », *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, vol. 83, n°9, p. 858-864.

Kjiellberg et Wide, 1988 – Kjiellberg, A. et P. Wide. *Effects of Simulated Ventilation Noise on Performance of Grammatical Reasoning Task*, communication présentée dans le cadre du Noise as a Public Health Problem, Stockholm, Suède.

Klatte *et al.*, 2013 – Klatte, M., K. Bergstroem et T. Lachmann. « Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children », *Frontiers in Psychology*, vol. 4, p. 578.

Krogh, 2011 – Krogh, C. M. E. « Industrial wind turbine development and loss of social justice? », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 31, n°4, p. 321-333.

Krogh *et al.*, 2011 – Krogh, C. M. E., L. Gillis, N. Kouwen et J. Aramini. « WindVOiCe, a self-reporting survey: Adverse health effects, industrial wind turbines, and the need for vigilance monitoring », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 31, n°4, p. 334-345.

Kurakata et Mizunami, 2008 – Kurakata, K. et T. Mizunami. « The statistical distribution of normal hearing thresholds for low-frequency tones », *Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 27, n°2, p. 97-104.

Kuwano *et al.*, 2013 – Kuwano, S., T. Yano, T. Kageyama, S. Sueoka et H. Tachibana. *Social Survey on Community Response to Wind Turbine Noise*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

Lane, 2013 – Lane, J. *Association Between Industrial Wind Turbine Noise and Sleep Quality in a Comparison Sample of Rural Ontarians*, Waterloo, ON, Université de Waterloo.

Lazarus et Folkman, 1984 – Lazarus, R. S. et S. Folkman. *Stress, Appraisal and Coping*. New York, NY, Springer Publishing Company.

Lee *et al.*, 2011 – Lee, S., K. Kim, W. Choi et S. Lee. « Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise », *Noise Control Engineering Journal*, vol. 59, n°1, p. 38-46.

Leventhall, 2009 – Leventhall, G. « Low Frequency Noise. What we know, what we do not know, and what we would like to know », *Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 28, n°2, p. 79-104.

Leventhall, 2011 – Leventhall, G. « Chapter 1. Basic Acoustics », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

Madsen et Pedersen, 2010 – Madsen, K. D. et T. H. Pedersen. *EFP-06 Project: Low Frequency Noise from Large Wind Turbines (www.madebydelta.com search for EFP-06)*, Hørsholm, Danemark, Delta, performed for the Danish Energy Authority.

Maffei *et al.*, 2013 – Maffei, L., T. Iachini, M. Masullo, F. Aletta, F. Sorrentino, V. P. Senese et F. Ruotolo. « The effects of vision-related aspects on noise perception of wind turbines in quiet areas », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 10, n°5, p. 1681-1697.

Magari *et al.*, 2014 – Magari, S. R., C. E. Smith, M. Schiff et A. C. Rohr. « Evaluation of community response to wind turbine-related noise in Western New York State », *Noise & Health*, vol. 16, n°71, p. 228.

Manwell *et al.*, 2010 – Manwell, J. F., J. G. McGowan et A. L. Rogers. *Wind Energy Explained: Theory, Design And Application*. 2e éd. Chichester, Royaume-Uni, John Wiley & Sons Ltd.

Maschke et Hecht, 2004 – Maschke, C. et K. Hecht. « Stress hormones and sleep disturbances - electrophysiological and hormonal aspects », *Noise & Health*, vol. 6, n°22, p. 49-54.

Masotti et Hodgetts, 2011 – Masotti, P. et M. Hodgetts. *Wind Turbines and Health: A Modified Scoping Review*, Kingston, ON, Kingston, Frontenac, Lennox & Addington (KFL&A) Public Health.

Mathias *et al.*, 2008 – Mathias, B., M. Uwe, E. Eva-Maria, K. Götz et G. Barbara. « Aircraft noise effects on sleep: A systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations », *Physiological Measurement*, vol. 29, n°9, p. 1089.

McBride *et al.*, 2013 – McBride, D., D. Shepherd, D. Welch et K. N. Dirks. *A Longitudinal Study of the Impact of Wind Turbine Proximity on Health Related Quality of Life*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

MDDELCC, 2006 – Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques. *Traitement des plaintes sur le bruit et exigences aux entreprises qui le génèrent*, Québec, QC, MDDELCC.

ME, 2008 – Ministère de l'Environnement. *Lignes directrices visant le bruit émis par les centrales éoliennes*, Toronto, ON, ME,.

Merlin *et al.*, 2013 – Merlin, T., S. Newton, B. Ellery, J. Milverton et C. Farah. *Systematic Review of the Human Health Effects of Wind Farms*, Adélaïde, Australie, National Health and Medical Research Council.

Miedema et Oudshoorn, 2001 – Miedema, H. M. et C. G. Oudshoorn. « Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals », *Environmental Health Perspectives*, vol. 109, n°4, p. 409-419.

Minor, 2000 – Minor, L. B. « Superior canal dehiscence syndrome », *American Journal of Otology*, vol. 21, n°1, p. 9-19.

Minor *et al.*, 1998 – Minor, L. B., D. Solomon, J. S. Zinreich et D. S. Zee. « Sound- and/or pressure-induced vertigo due to bone dehiscence of the superior semicircular canal », *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, vol. 124, n°3, p. 249-258.

Møller et Pedersen, 2011 – Møller, H. et C. S. Pedersen. « Low-frequency noise from large wind turbines », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, p. 3727-3744.

Møller *et al.*, 2011 – Møller, H., C. S. Pedersen et S. Pedersen. *Lavfrekvent støj fra store vindmøller-opdateret 2011*. Acoustics, Department of Electronic Systems, Aalborg University.

Mroczek *et al.*, 2012 – Mroczek, B., D. Kurpas et B. Karakiewicz. « Influence of distances between places of residence and wind farms on the quality of life in nearby areas », *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, vol. 19, n°4, p. 692-696.

Mulvaney *et al.*, 2013 – Mulvaney, K. K., P. Woodson et L. S. Prokopy. « Different shades of green: A case study of support for wind farms in the rural midwest », *Environmental Management*, vol. 51, p. 1012-1024.

Münzel *et al.*, 2014 – Münzel, T., T. Gori, W. Babisch et M. Basner. « Cardiovascular effects of environmental noise exposure », *European Heart Journal*, vol. 35, n°13, p. 829-836.

Muzet, 2007 – Muzet, A. « Environmental noise, sleep and health », *Sleep Medicine Reviews*, vol. 11, n°2, p. 135-142.

Nagai *et al.*, 1989 – Nagai, N., M. Matsumoto, Y. Yamasumi, T. Shiraishi, K. Nishimura, K. Matsumoto,…S. Takeda. « Process and emergence on the effects of infrasonic and low frequency noise on inhabitants », *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 8, p. 87-99.

Ndrepepa et Twardella, 2011 – Ndrepepa, A. et D. Twardella. « Relationship between noise annoyance from road traffic noise and cardiovascular diseases: A meta-analysis », *Noise & Health*, vol. 13, n°52, p. 251.

Nelson *et al.*, 2005 – Nelson, D. I., R. Y. Nelson, M. Concha-Barrientos et M. Fingerhut. « The global burden of occupational noise-induced hearing loss », *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 48, n°6, p. 446-458.

NHMRC, 2010 – National Health and Medical Research Council. *Wind Turbines and Health: A Rapid Review of the Evidence*, Canberra, Australie, NHMRC.

NHMRC, 2014 – National Health and Medical Research Council. *NHMRC Draft Information Paper: Evidence on Wind Farms and Human Health*, Canberra, Australie, NHMRC.

Nissenbaum *et al.*, 2012 – Nissenbaum, M. A., J. J. Aramini et C. D. Hanning. « Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health », *Noise & Health*, vol. 14, p. 237-243.

NSF, 2013 – National Sleep Foundation. *Bedroom Poll: Summary of Findings*, Washington, DC, NSF.

Oerlemans, 2009 – Oerlemans, S. *Detection of Aeroacoustic Sound Sources on Aircraft and Wind Turbines*. Thèse. Zwolle, Pays-Bas, University of Twente, Enschede.

Oerlemans, 2011 – Oerlemans, S. « Chapter 2. Primary Noise Sources », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

Oerlemans et Méndez López, 2005 – Oerlemans, S. et M. Méndez López. *Acoustic Array Measurements on a Full Scale Wind Turbine*, Madrid, Espagne, National Aerospace Laboratory NLR.

Oerlemans et Schepers, 2009 – Oerlemans, S. et J. Schepers. « Prediction of wind turbine noise and validation against experiment », *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 8, n°6, p. 555-584.

Oerlemans *et al.*, 2007 – Oerlemans, S., P. Sijtsma et B. Méndez López. « Location and quantification of noise sources on a wind turbine », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 299, n°4–5, p. 869-883.

Öhrström, 1989 – Öhrström, E. « Sleep distrubance, psycho-social and medial symptoms: A pilot survey among persons exposed to high-levels of road traffice noise », *Journal of Sound and Vibration* vol. 133, n°1, p. 117-128.

Öhrström et Rylander, 1982 – Öhrström, E. et R. Rylander. « Sleep disturbance effects of traffic noise—A laboratory study on after effects », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 84, n°1, p. 87-103.

Ollson *et al.*, 2013 – Ollson, C. A., L. D. Knopper, L. C. McCallum et M. L. Whitfield-Aslund. « Letter to Editor: Are the findings of "Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health" supported? », *Noise & Health*, vol. 15, p. 148-151.

Olson, 1972 – Olson, H. F. « The measurement of loudness », *Audio Magazine*, p. 18-22.

OMS, 1946 – Organisation mondiale de la Santé. *Constitution de l'Organisaiton mondiale de la Santé*, OMS.

OMS, 1999 – Organisation mondiale de la Santé. *Guidelines for Community Noise*, OMS.

OMS, 2009 – Organisation mondiale de la Santé. *Night Noise Guidelines for Europe*, Copenhague, Danemark, OMS.

OMS, 2011 – Organisation mondiale de la Santé. *Burden of Disease from Environmental Noise*, OMS.

OMS, 2013 – Organisation mondiale de la Santé. *Cardiovascular diseases (CVDs): Fact Sheet No. 317*, Genève, Suisse, OMS.

OMS, 2014 – Organisation mondiale de la Santé. *Diabetes: Fact sheet N°312*, Genève, Suisse, OMS.

ONE, 2013 – Office national de l'énergie. *Avenir énergétique du Canada en 2013 - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2035*, Calgary, AB, ONE.

Palmer *et al.*, 2002 – Palmer, K., M. Griffin, H. Syddall, A. Davis, B. Pannett et D. Coggon. « Occupational exposure to noise and the attributable burden of hearing difficulties in Great Britain », *Occupational and environmental medicine*, vol. 59, n°9, p. 634-639.

Pasqualetti, 2002 – Pasqualetti, M. J. « Living with Wind Power in a Hostile Landscape », dans, Pasqualetti, M. J., P. Gipe et R. W. Righter (réd.), *Wind Power in View: Energy Landscapes in a Crowded World*, San Diego, CA, Academic Press.

Passchier-Vermee et Passchier, 2006 – Passchier-Vermeer, W. et W. F. Passchier. « Environmental Noise, Annoyance and Sleep Disturbance », dans, Nicolopoulou-Stamati, P., L. Hens et V. Howard (réd.), *Environmental Health Impacts of Transport and Mobility*, Dordrecht, Pays-Bas, Springer Science & Business Media.

Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2013 – Pawlaczyk-Łuszczynska, M., A. Dudarewicz, K. Zaborowski, M. Zamojska et M. Waszkowska. « Assessment of annoyance due to wind turbine noise », *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 19, n°1, p. 1-9.

Pawlaczyk-Łuszczyńska *et al.*, 2014 – Pawlaczyk-Łuszczynska, M., A. Dudarewicz, K. Zaborowski, M. Zamojska-Daniszewska et M. Waszkowska. « Evaluation of annoyance from the wind turbine noise–A pilot study », *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, vol. 27, n°3, p. 364-388.

Pedersen, 2011 – Pedersen, E. « Health aspects associated with wind turbine noise — Results from three field studies », *Noise Control Engineering Journal*, vol. 59, p. 47-53.

Pedersen et Larsman, 2008 – Pedersen, E. et P. Larsman. « The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines », *Journal of Environmental Psychology*, vol. 28, p. 379-389.

Pedersen et Persson Waye, 2004 – Pedersen, E. et K. Persson Waye. « Perception and annoyance due to wind turbine noise: A dose-response relationship », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 116, p. 3460-3470.

Pedersen et Persson Waye, 2007 – Pedersen, E. et K. Persson Waye. « Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments », *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 64, p. 480-486.

Pedersen et Persson Waye, 2008 – Pedersen, E. et K. Persson Waye. « Wind turbines—low level noise sources interfering with restoration? », *Environmental Research Letters*, vol. 3, p. 015002.

Pedersen *et al.*, 2007a – Pedersen, E., L.-M. Hallberg et K. Persson Waye. « Living in the vicinity of wind turbines — A grounded theory study », *Qualitative Research in Psychology*, vol. 4, p. 49-63.

Pedersen *et al.*, 2007b – Pedersen, S., H. Møller et K. Persson Waye. « Indoor Measurements of Noise at Low Frequencies - Problems and Solutions », *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 26, n°4, p. 249-270.

Pedersen *et al.*, 2009 – Pedersen, E., F. van den Berg, R. Bakker et J. Bouma. « Response to noise from modern wind farms in The Netherlands », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, p. 634-643.

Pedersen *et al.*, 2010 – Pedersen, E., F. van den Berg, R. Bakker et J. Bouma. « Can road traffic mask sound from wind turbines? Response to wind turbine sound at different levels of road traffic sound », *Energy Policy*, vol. 38, n°5, p. 2520-2527.

Perron *et al.*, 2012 – Perron, S., L.-F. Tétreault, N. King, C. Plante et A. Smargiassi. « Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults », *Noise & Health*, vol. 14, n°57, p. 58-67.

Persson Waye, 2005 – Persson Waye, K. « Adverse effects of moderate levels of low frequency noise in the occupational environment », *ASHRAE Transactions*, vol. 111, n°1, p. 672-683.

Persson Waye, 2009 – Persson Waye, K. *Perception and Environmental Impact of Wind Turbine Noise*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Ottawa, ON.

Persson Waye, 2011 – Persson Waye, K. « Effects of Low Frequency Noise and Vibrations: Environmental and Occupational Perspectives », dans, Nriagu, J. (réd.), *Encyclopedia of Environmental Health*, vol. 2, Ann Arbor, MI, Burlington.

Persson Waye et Björkman, 1988 – Persson Waye, K. et M. Björkman. « Annoyance due to low frequency noise and the use of the dB (A) scale », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 127, n°3, p. 491-497.

Persson Waye et Öhrström, 2002 – Persson Waye, K. et E. Öhrström. « Psychoacoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 250, n°1, p. 65-73.

Persson Waye et Rylander, 2001 – Persson Waye, K. et R. Rylander. « The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 240, n°3, p. 483-497.

Persson Waye *et al.*, 2003 – Persson Waye, K., A. Clow, S. Edwards, F. Hucklebridge et R. Rylander. « Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality », *Life Sciences*, vol. 72, n°8, p. 863-875.

Pfammatter *et al.*, 2010 – Pfammatter, A., V. Darrouzet, M. Gärtner, T. Somers, J. Van Dinther, F. Trabalzini,…T. A. Linder. « Superior semicircular canal dehiscence syndrome multicenter study: Is there an association between size and symptoms? », *Ontology & Neurotology* vol. 31, n°3, p. 447-454.

Pierpont, 2006 – Pierpont, N. *Wind Turbine Syndrome: Noise, Shadow Flicker, and Health.*

Pierpont, 2009 – Pierpont, N. *Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment.* Santa Fe, NM, K-Selected Books.

RABDTI, 2007 – Renewables Advisory Board and DTI. *The Protocol for Public Engagement with Proposed Wind Energy Developments in England*, Londres, Royaume-Uni, Centre for Sustainable Energy with BDOR and Peter Capener.

Règlement de l'Ontario, 2012 – Règlement de l'Ontario. *Loi sur la protection de l'environnement*, Règlement de l'Ontario.

RenewableUK, 2013 – RenewableUK. *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect*, Londres, Royaume-Uni, RenewableUK.

Rief *et al.*, 2011 – Rief, W., A. J. Barsky, J. A. Glombiewski, Y. Nestoriuc, H. Glaesmer et E. Braehler. « Assessing general side effects in clinical trials: Reference data from the general population », *Pharmacoepidemiol. Drug Saf.*, vol. 20, n°4, p. 405-415.

Robert et Hockey, 1997 – Robert, G. et J. Hockey. « Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework », *Biological Psychology*, vol. 45, n°1, p. 73-93.

Roberts et Roberts, 2013 – Roberts, J. D. et M. A. Roberts. « Wind turbines: Is there a human health risk? », *Journal of Environmental Health*, vol. 75, p. 8-13, 16-17.

Robertson et Ireland, 1995 – Robertson, D. D. et D. J. Ireland. « Vestibular evoked myogenic potentials. », *Journal of Otolaryngology* vol. 24, n°1, p. 3-8.

Rod, 2012 – Rod, J. *Health & Safety Impacts from Large-Scale Wind Turbines*, Kentville, NS, Municipality of the County of Kings.

Ruotolo *et al.*, 2012 – Ruotolo, F., V. P. Senese, G. Ruggiero, L. Maffei, M. Masullo et T. Iachini. « Individual reactions to a multisensory immersive virtual environment: The impact of a wind farm on individuals », *Cognitive Processing*, vol. 13, Suppl 1, p. S319-323.

Russo *et al.*, 2014 – Russo, J. E., M. G. Crowson, E. J. DeAngelo, C. J. Belden et J. E. Saunders. « Posterior semicircular canal dehiscence: CT prevalence and clinical symptoms », *Ontology & Neurotology*, vol. 35, n°2, p. 310-314.

Rylander, 2004 – Rylander, R. « Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 277, n°3, p. 471-478.

Salt et Hullar, 2010 – Salt, A. N. et T. E. Hullar. « Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines », *Hearing Research*, vol. 268, p. 12-21.

Salt et Kaltenbach, 2011 – Salt, A. N. et J. A. Kaltenbach. « Infrasound from wind turbines could affect humans », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 31, p. 296-302.

Salt *et al.*, 2013 – Salt, A. N., J. T. Lichtenhan, R. M. Gill et J. J. Hartsock. « Large endolymphatic potentials from low-frequency and infrasonic tones in the guinea pig », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, n°3, p. 1561-1571.

Santé Canada, 2003a – Santé Canada. *La surveillance des maladies chroniques au Canada. Document de référence*, Ottawa, ON, Direction générale de la santé de la population et de la santé publique, Santé Canada.

Santé Canada, 2003b – Santé Canada. *Leçons de la crise du SRAS*, Ottawa, ON, Santé Canada.

Santé Canada, 2011 – Santé Canada. *Rapport annuel de 2010-2011 sur l'application de la Loi canadienne sur la santé*, Ottawa, ON, Santé Canada.

Santé Canada, 2012 – Santé Canada. *Health Canada Announces Wind Turbine Noise and Health Study*. Adresse : http://www.hc-sc.gc.ca/ahc-asc/media/nr-cp/_2012/2012-109-eng.php (dernière consultation : juillet 2014).

Santé Canada, 2013a – Santé Canada. *Consultation sur la conception de l'Étude de Santé Canada sur le bruit des éoliennes et la santé*. Adresse : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/consult/_2013/wind_turbine-eoliennes/index-fra.php (dernière consultation : août 2014).

Santé Canada, 2013b – Santé Canada. *Consultation sur la conception de l'Étude de Santé Canada sur le bruit des éoliennes et la santé*. Adresse : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/consult/_2013/wind_turbine-eoliennes/index-fra.php (dernière consultation : août 2014).

Santé Canada, 2014a – Santé Canada. *Étude sur le bruit des éoliennes et la santé : résumé des résultats*. Adresse : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/noise-bruit/turbine-eoliennes/summary-resume-fra.php (dernière consultation : novembre 2014).

Santé Canada, 2014b – Santé Canada. *Exposition aux émissions sonores des éoliennes et effets sur la santé : Plan de recherche et évaluation de l'exposition au bruit mis à jour*. Adresse : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/consult/_2013/wind_turbine-eoliennes/research_recherche-fra.php (dernière consultation : novembre 2014).

Schomer *et al.*, 2010 – Schomer, P., A. Brown, B. De Coensel, K. Genuit, T. Gjestland, J. Y. Jeon,…G. Watts. *On Efforts to Standardize a Graphical Description of the Soundscape Concept*, communication présentée dans le cadre du Proceedings of the International Congress on Noise Control Engineering (internoise), Lisbonne, Portugal.

Schulte-Fortkamp, 2014 – Schulte-Fortkamp, B. « Balancing the research approach on wind turbine effects through improving psychological factors that affect community response », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 136, n°4, p. 2204-2204.

Schust, 2004 – Schust, M. « Effects of low frequency noise up to 100 Hz », *Noise and Health*, vol. 6, n°23, p. 73-85.

Seong *et al.*, 2013 – Seong, Y., S. Lee, D. Y. Gwak, Y. Cho, J. Hong et S. Lee. *An Experimental Study on Rating Scale for Annoyance Due to Wind Turbine Noise*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

Shepherd *et al.*, 2011 – Shepherd, D., D. McBride, D. Welch, K. N. Dirks et E. M. Hill. « Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life », *Noise & Health*, vol. 13, p. 333-339.

Sierra Club Canada, 2011 – Sierra Club Canada. *The Real Truth About Wind Energy: A Literature Review on Wind Turbines in Ontario*, Ottawa, ON, Sierra Club Canada.

Søndergaard, 2011 – Søndergaard, B. « Chapter 4. Wind Turbine Noise at the Receiver », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

Søndergaard et Madsen, 2008 – Søndergaard, B. et K. D. Madsen. *Low Frequency Noise from Large Wind Turbines: Results from Sound Power Measurements*, Venlighedsvej, Danemark, Danish Electronics, Light & Acoustics.

Sørensen *et al.*, 2012 – Sørensen, M., Z. J. Andersen, R. B. Nordsborg, T. Becker, A. Tjonneland, K. Overvad et O. Raaschou-Nielsen. « Long-term exposure to road traffic noise and incident diabetes: A cohort study », *Environmental Health Perspectives*, vol. 121, n°2, p. 217-222.

Spreng, 2000 – Spreng, M. « Central nervous system activation by noise », *Noise & Health*, vol. 2, n°7, p. 49.

Stansfeld, 2003 – Stansfeld, S. A. « Noise pollution: Non-auditory effects on health », *British Medical Bulletin*, vol. 68, n°1, p. 243-257.

Stansfeld *et al.*, 2000 – Stansfeld, S., M. Haines, M. Burr, B. Berry et P. Lercher. « A review of environmental noise and mental health », *Noise & Health*, vol. 2, n°8, p. 1.

Stansfeld *et al.*, 2005 – Stansfeld, S. A., B. Berglund, C. Clark, I. Lopez-Barrio, P. Fischer, E. Öhrström,…I. Van Kamp. « Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: A cross-national study », *The Lancet*, vol. 365, n°9475, p. 1942-1949.

Stansfeld *et al.*, 2009 – Stansfeld, S. A., M. M. Haines, B. Berry et M. Burr. « Reduction of road traffic noise and mental health: An intervention study », *Noise & Health*, vol. 11, n°44, p. 169.

Suls, 2013 – Suls, J. « Anger and the heart: Perspectives on cardiac risk, mechanisms and interventions », *Progress in Cardiovascular Diseases*, vol. 55, n°6, p. 538-547.

Sygna *et al.*, 2014 – Sygna, K., G. M. Aasvang, G. Aamodt, B. Oftedal et N. H. Krog. « Road traffic noise, sleep and mental health », *Environmental Research*, vol. 131, p. 17-24.

Tachibana *et al.*, 2014 – Tachibana, H., H. Yano, A. Fukushima et S. Sueoka. « Nationwide field measurements of wind turbine noise in Japan », *Noise Control Engineering Journal*, vol. 62, n°2, p. 90-101.

Takahashi, 2011 – Takahashi, Y. « A study on the contribution of body vibrations to the vibratory sensation induced by high-level, complex lowfrequency noise », *Noise & health*, vol. 13, n°50, p. 2-8.

Tamura *et al.*, 2012 – Tamura, H., N. Ohgami, I. Yajima, M. Iida, K. Ohgami, N. Fujii,…M. Kato. « Chronic exposure to low frequency noise at moderate levels causes impaired balance in mice », *PloS One*, vol. 7, n°6, p. e39807.

Tassi *et al.*, 2010 – Tassi, P., M. Saremi, S. Schimchowitsch, A. Eschenlauer, O. Rohmer et A. Muzet. « Cardiovascular responses to railway noise during sleep in young and middle-aged adults », *European Journal of Applied Physiology*, vol. 108, n°4, p. 671-680.

Thibault *et al.*, 2013 – Thibault, B., E. Angen et T. Weis. *Survey of Complaints Received by Relevant Authorities Regarding Operating Wind Energy in Alberta*, Calgary, AB, The Pembina Institute.

Todd *et al.*, 2008 – Todd, N. P. M., S. M. Rosengren et J. G. Colebatch. « Tuning and sensitivity of the human vestibular system to low-frequency vibration », *Neuroscience Letters*, vol. 444, p. 36-41.

Toke *et al.*, 2008 – Toke, D., S. Breukers et M. Wolsink. « Wind power deployment outcomes: How can we account for the differences? », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, n°4, p. 1129-1147.

Tullio, 1929 – Tullio, P. *Das Ohr und die Entstehung der Sprache und Schrift*. Berlin, Allemagne, Urban & Schwarzenberg.

van den Berg, 2011 – van den Berg, F. « Chapter 6. Effects of Sound on People », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

van den Berg et Bowdler, 2011 – van den Berg, F. et D. Bowdler. « Chapter 5. Amplitude Modulation », dans, Bowdler, D. et G. Leventhall (réd.), *Wind Turbine Noise*, Essex, Royaume-Uni, Multi-Science Publishing Company, Ltd.

van den Berg *et al.*, 2008 – van den Berg, F., E. Pedersen, J. Bouma et R. Bakker. *WINDFARMperception: Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents*, Groningen, Pays-Bas, University of Groningen, University of Gotenburg, Science Shop for Medicine and Public Health Applied Health Research.

Van Gemmert et Van Galen, 1997 – Van Gemmert, A. W. et G. P. Van Galen. « Stress, neuromotor noise, and human performance: A theoretical perspective », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 23, n°5, p. 1299-1313.

Van Kamp et Davies, 2008 – Van Kamp, I. et H. Davies. *Noise as a Public Health Problem*, communication présentée dans le cadre du Proceedings of 9th Congress of the International Commission on the Biological Effects of Noise (ICBEN), Foxwoods, CT.

van Kamp *et al.*, 2004 – van Kamp, I., R. F. S. Job, J. Hatfield, M. Haines, R. K. Stellato et S. A. Stansfeld. « The role of noise sensitivity in the noise-response relation: A comparison of three international airport studies », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 116, n°6, p. 3471-3479.

van Kempen et Babisch, 2012 – van Kempen, E. et W. Babisch. « The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: A meta-analysis », *Journal of Hypertension*, vol. 30, n°6, p. 1075-1086.

van Kempen *et al.*, 2002 – van Kempen, E. E., H. Kruize, H. C. Boshuizen, C. B. Ameling, B. A. Staatsen et A. E. de Hollander. « The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease: A meta-analysis », *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, n°3, p. 307-317.

Van Renterghem *et al.*, 2013 – Van Renterghem, T., A. Bockstael, V. De Weirt et D. Botteldooren. « Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise », *The Science of the Total Environment*, vol. 456-457, p. 333-345.

von Hünerbein *et al.*, 2013 – von Hünerbein, S., A. King, B. Piper et M. Cand. « Work Package B2: Development of an AM Dose-Response Relationship », dans, RenewableUK (réd.), *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effects*, Londres, Royaume-Uni, University of Salford, Acoustics Research Centre.

Wagner *et al.*, 1996 – Wagner, S., R. Bareiss et G. Guidati. *Wind Turbine Noise*. Berlin, Allemagne, Springer.

Watanabe et Møller, 1990 – Watanabe, T. et H. Møller. « Low frequency hearing thresholds in free field », *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 9, p. 106-115.

Welford, 1974 – Welford, A. T. « Stress and Performance », dans, Welford, A. T. (réd.), *Man Under Stress*, New York, NY, Halsted Press.

Welgampola *et al.*, 2008 – Welgampola, M. S., A. M. Oluwaseum, L. B. Minor et J. P. Carey. « Vestibular-evoked myogenic potential thresholds normalize on plugging superior canal dehiscence. », *Neurology*, vol. 70, n°6, p. 464-472.

Willich *et al.*, 2006 – Willich, S. N., K. Wegscheider, M. Stallmann et T. Keil. « Noise burden and the risk of myocardial infarction », *European Heart Journal*, vol. 27, n°3, p. 276-282.

Wolsink, 2007 – Wolsink, M. « Wind power implementation: The nature of public attitudes: Equity and fairness instead of 'backyard motives' », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, p. 1188-1207.

Yano *et al.*, 2012 – Yano, T., S. Lee et T. Gjestland. « Community response to noise », *Noise & Health*, vol. 14, n°61, p. 303.

Yano *et al.*, 2013 – Yano, T., S. Kuwano, T. Kageyama, S. Sueoka et H. Tachibana. *Dose-response Relationships for Wind Turbine Noise in Japan*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

Yokoyama *et al.*, 2013 – Yokoyama, S., S. Sakamoto et H. Tachibana. *Study on the Amplitude Modulation of Wind Turbine Noise: Part 2 Auditory Experiments*, communication présentée dans le cadre du INTER-NOISE 2013, the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Innsbruck, Autriche.

Zajamsek *et al.*, 2014 – Zajamsek, B., D. J. Moreau et C. J. Doolan. « Characterising noise and annoyance in homes near a wind farm », *Acoustics Australia*, vol. 42, n°1, p. 15.

Zhang *et al.*, 2012 – Zhang, A. S., S. Govender et J. G. Colebatch. « Tuning of the ocular vestibular evoked myogenic potential to bone-conducted sound stimulation », *Journal of Applied Psychology*, vol. 112, n°8, p. 1279-1290.

Évaluations du Conseil des académies canadiennes

Les rapports d'évaluation ci-dessous peuvent être téléchargés depuis le site Web du CAC (www.sciencepourlepublic.ca) :

- Compréhension des donnés : Bruit des éoliennes (2015)
- L'accès aux données sur la santé et aux données connexes au Canada (Mars 2015)
- À la fine pointe du monde numérique : possibilités pour les institutions de la mémoire collective au Canada (Février 2015)
- Le maintien de l'ordre au Canada au XXIe siècle : Une nouvelle police pour de nouveaux défis (Novembre 2014)
- Prix de l'énergie et prise de décision dans les entreprises au Canada : paver la voie à un avenir énergétique (2014)
- Améliorer les médicaments pour enfants au Canada (2014)
- Culture scientifique : Qu'en est-il au Canada? (2014)
- Promouvoir la durabilité dans un monde interconnecté (2014)
- Incidences environnementales de l'extraction du gaz de schiste au Canada (2014)
- Sécurité alimentaire dans le Nord du Canada – État des connaissances (2014)
- Les sciences de la mer au Canada : Relever le défi, saisir l'opportunité (2013)
- Effets sur la santé de l'utilisation des armes à impulsions (2013)
- L'état de la R-D industrielle au Canada (2013)
- Incidences de l'innovation : mesure et évaluation (2013)
- L'eau et l'agriculture au Canada : vers une gestion durable des ressources en eau (2013)
- Renforcer la capacité de recherche du Canada : La dimension de genre (2012)
- L'état de la science et de la technologie au Canada, 2012 (2012)
- Éclairer les choix en matière de recherche : Indicateurs et décisions (2012)
- Nouvelles technologies et évaluation de la sécurité chimique (2012)
- Des animaux en santé, un Canada en santé (2011)
- La taxonomie canadienne : explorer la biodiversité, créer des possibilités (2010)
- Honnêteté, responsabilité et confiance : Promouvoir l'intégrité en recherche au Canada (2010)
- Meilleure recherche = Meilleur management (2009)
- La gestion durable des eaux souterraines au Canada (2009)
- Innovation et stratégies d'entreprise : pourquoi le Canada n'est pas à la hauteur (2009)
- Vision pour l'initiative canadienne de recherche dans l'Arctique – Évaluation des possibilités (2009)

- La production d'énergie à partir des hydrates de gaz – potentiel et défis pour le Canada (2008)
- Petit et différent : perspective scientifique sur les défis réglementaires du monde nanométrique (2008)
- La transmission du virus de la grippe et la contribution de l'équipement de protection respiratoire individuelle – Évaluation des données disponibles (2007)
- L'État de la science et de la technologie au Canada (2006)

Les évaluations suivantes font présentement l'objet de délibérations de comités d'experts :

- Compétences en STGM pour l'avenir
- La capacité potentielle des technologies nouvelles et émergentes de réduire les incidences environnementales de l'exploitation des sables bitumineux
- LES RISQUES : Le message passe-t-il?
- Consommation énergétique et changements climatiques : une synthèse des données les plus récentes

Conseil des gouverneurs du Conseil des académies canadiennes*

Margaret Bloodworth, C.M., présidente, ancienne sous-ministre au fédéral et conseillère nationale pour la sécurité (Ottawa, Ont.)

Graham Bell, MSRC, président, Société royale du Canada; directeur de recherche, professeur titulaire de la chaire James McGill, Département de biologie, Université McGill (Montréal, Qc)

John Cairns, MACSS, président, Académie canadienne des sciences de la santé; professeur de médecine, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

Henry Friesen, C.C., MSRC, MACSS, vice-président, professeur émérite distingué et membre principal du Centre pour le progrès de la médecine, Faculté de médecine, Université du Manitoba (Winnipeg, Man.)

Carol P. Herbert, MACSS, professeure de médecine familiale, Université Western (London, Ont.)

Claude Jean,** premier vice-président et directeur général, Teledyne DALSA, Semiconducteur (Bromont, Qc)

Peter MacKinnon, O.C., ancien président et vice-recteur, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, Sask.)

Jeremy McNeil, MSRC, professeur invité Helen Battle de chimie écologique, Université Western (London, Ont.)

Axel Meisen, C.M., MACG, ancien président, Prévision, Alberta Innovates – Technology Futures (AITF) (Edmonton, Alb.)

Lydia Miljan, professeure agrégée en sciences politiques et directrice du programme des arts et des sciences, Université de Windsor (Windsor, Ont.)

Ted Morton, chercheur principal, École de politiques publiques, professeur de sciences politiques, Université de Calgary (Calgary, Alb.)

P. Kim Sturgess, MACG, présidente-directrice générale et fondatrice, Alberta WaterSMART (Calgary, Alb.)

* Renseignements à jour en mars 2015
** À démissionné dans l'EF 2014–2015

Comité consultatif scientifique du Conseil des académies canadiennes*

Susan A. McDaniel, MSRC, présidente, directrice de l'Institut Prentice; titulaire de la Chaire de recherche du canada de premier niveau sur la population mondiale et le cours de la vie; titulaire de la chaire de recherche Prentice en démographie et économie mondiales, professeure de sociologie, Université de Lethbridge (Lethbridge, Alb.)

Lorne Babiuk, O.C., MSRC, MACSS, vice-président à la recherche, Université de l'Alberta (Edmonton, Alb.)

Murray S. Campbell, premier responsable, Programme de recherche en analytique des affaires, Centre de recherche T.J. Watson d'IBM (Yorktown Heights, NY)

Clarissa Desjardins, présidente-directrice générale, Clementia Pharmaceuticals Inc (Montréal, Qc)

Jean Gray, C.M., MACSS, professeure émérite de médecine, Université Dalhousie (Halifax, N.-É.)

John Hepburn, MSRC, vice-président à la recherche et aux affaires internationales, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

Gregory S. Kealey, MSRC, professeur, Département d'histoire, Université du Nouveau-Brunswick (Fredericton, N.-B.)

Daniel Krewski, professeur d'épidémiologie et de médecine communautaire, directeur scientifique du Centre R. Samuel McLaughlin d'évaluation du risque sur la santé des populations, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

Avrim Lazar, ancien président et chef de la direction, Association des produits forestiers du Canada (Ottawa, Ont.)

Norbert Morgenstern, C.M., MSRC, FACG, professeur émérite d'université en génie civil, Université de l'Alberta (Edmonton, Alb.)

Sarah P. Otto, MSRC, professeure et directrice du Centre de recherche sur la biodiversité, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

* Renseignements à jour en mars 2015

Council of Canadian Academies
Conseil des académies canadiennes

Conseil des académies canadiennes
180 rue Elgin, bureau 1401
Ottawa (Ontario) K2P 2K3
Tél. : 613 567-5000
www.sciencepourlepublic.ca