

Eoliennes et santé humaine

Revue de la littérature et recommandations

Nicole Lachat, biologiste, Dr ès sciences ¹

Juin 2011

¹ Adresse : Les Barrières 9, 2340 Le Noirmont, Jura, Suisse.

Notes de l'auteure

- ❖ L'auteure n'a pas de conflit d'intérêt personnel en matière d'éoliennes et elle ne se considère pas à priori comme anti-éoliennes.
- ❖ Ce travail n'est ni commandé ni supporté financièrement, que ce soit par un groupe pro- ou anti-éolien, par une autorité politique ou par un développeur industriel d'éoliennes. Les recommandations exprimées dans ce dossier sont basées sur l'étude objective de nombreux articles et travaux scientifiques de diverses provenances.

Copyright © Nicole Lachat 2011.

Table des matières

1. Préambule	5
2. Avertissement.....	6
3. Sons et infrasons : rappel théorique	6
3.1. Définitions.....	6
3.2. Infrasons.....	7
4. Nuisances dues aux sons produits par les éoliennes	8
4.1. Définitions.....	8
4.2. Distance aux habitations	8
4.3. Niveau sonore	9
4.4. Sons produits par les éoliennes	10
4.4.1. Bruits mécaniques.....	10
4.4.2. Bruits aérodynamiques	10
5. Nuisances dues aux infrasons produits par les éoliennes	11
5.1. Perception des infrasons	12
5.2. Rappel anatomique	13
5.3. Oreille interne et équilibre.....	14
5.4. Infrasons et santé.....	14
6. Eoliennes et santé humaine	15
6.1. Le rapport Pierpont.....	15
6.2. Etudes convergentes.....	16
7. Le syndrome éolien	16
7.1. Définition et symptômes	16
7.2. Méthode	17
7.3. Epidémiologie.....	17
7.4. Résultats	18
7.5. Discussion des résultats.....	19
7.6. Les cas australiens.....	21
7.7. Effet nocébo et troubles somatoformes	22
8. Perspectives d'études.....	22
8.1. Impact visuel	23
8.2. Nuisances sonores et distance aux habitations.....	23
8.3. Impact sur l'humain et l'animal	23
8.4. Sons de basses fréquences et infrasons.....	23
9. Recommandations.....	24
9.1. Recommandations de l'OMS.....	24

9.2. Respect des riverains	25
9.3. Recommandations concernant les normes d'implantation	25
9.3.1. Distances d'implantation	26
9.3.2. Zones d'implantation	26
9.3.3. Nuisances sonores : un problème minimisé.....	27
9.4. Ecouter et donner la parole aux riverains	27
9.5. Recommandation finale.....	27
10. Conclusion.....	29
11. Bibliographie.....	30

1. Préambule

Un peu partout dans le monde, des voix s'élèvent pour dénoncer l'implantation d'éoliennes industrielles. Motivés d'abord par des problèmes d'atteintes aux paysages, les premiers opposants ont été rejoints rapidement par des riverains d'éoliennes industrielles qui veulent dire leur mal être et faire admettre que ces engins déterminent chez eux des symptômes avérés. Des associations luttant contre l'implantation de parcs éoliens industriels (« windfarms » en anglais) se sont créées dans de nombreux pays. En Europe, certaines d'entre elles se sont regroupées au sein de l'EPAW (European Platform Against Windfarms) qui compte actuellement 483 organisations dans 22 pays.

La Suisse compte elle aussi plusieurs de ces associations, la plupart ayant leur siège dans l'arc jurassien, région de prédilection des promoteurs helvétiques d'éoliennes (Fédération Pro Crêtes NE, Librevent JU, Les Travers du Vent NE, Les Amis de Mont-Racine NE, Sauvez les Préalpes FR, Association pour la Sauvegarde des Gittaz et du Mont-des-Cerfs VD, etc.).

En Suisse, alors que les études d'impact obligatoires précédant une autorisation d'implantation d'éoliennes font la part belle aux atteintes au paysage ou se préoccupent des répercussions sur les oiseaux ou les chauves-souris, aucune étude n'est requise (hormis de basiques mesures de bruits) en ce qui concerne les humains, et ceci malgré l'accroissement quotidien de plaintes et de prises de position de riverains.

Face à ce flux de protestations sans cesse croissant et au vu de symptômes semblant concorder d'un bout à l'autre du monde, il n'est plus envisageable de continuer à occulter ce problème.

Les buts de ce dossier sont donc les suivants:

- faire une revue de la littérature scientifique sur le sujet
- contribuer à démêler le vrai du faux, sans parti pris et hors contexte émotionnel
- donner une information complète, claire et impartiale aux personnes qui devront se positionner sur ce sujet dans le futur
- le cas échéant, fournir un cadre scientifique aux doléances des riverains
- émettre une série de recommandations

Ce dossier se base sur la lecture et l'étude d'une bonne partie de la littérature scientifique publiée sur le sujet, la plupart du temps en anglais (cf. bibliographie en fin de document), qu'elle soit européenne, nord-américaine ou encore australienne. Les nombreux sites internet dédiés à ce domaine, de même que les actes (proceedings) de plusieurs congrès scientifiques internationaux ont également été consultés.

Il existe plusieurs rapports en anglais faisant la revue de ce qui a déjà été publié sur le sujet (Frey et al. 2007, Stelling et al. 2010, Hanning 2010), mais à notre connaissance ce dossier sera le premier du genre en français.

2. Avertissement

La principale difficulté rencontrée dans ce travail a été de distinguer entre véritable littérature scientifique et articles non révisés, de même qu'entre sites internet fiables et pages orientées.

L'indépendance des différents auteurs, même s'ils sont des scientifiques reconnus, ne peut pas toujours être garantie. En effet, une étude sur les éventuelles incidences des éoliennes sur la santé humaine, mandatée par un grand groupe de fabricants d'éoliennes (par exemple l'American Wind Energy Association) ou à contrario par une association anti-éoliennes, peut-elle être considérée comme impartiale ? Toutefois, dans ce dossier, la très grande majorité des travaux considérés sont des études indépendantes, documentées, réalisées par des médecins, des acousticiens, des biologistes, examinées et approuvées par des pairs et publiées dans des revues scientifiques reconnues.

3. Sons et infrasons : rappel théorique

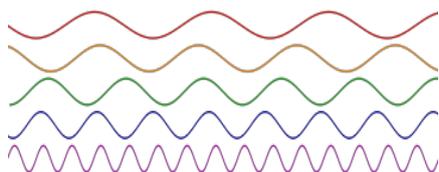
Avant d'examiner le caractère des plaintes émises par les riverains et afin de bien saisir de quoi il est question, il semble nécessaire de poser quelques éléments théoriques sur les sons et les infrasons.

3.1. Définitions

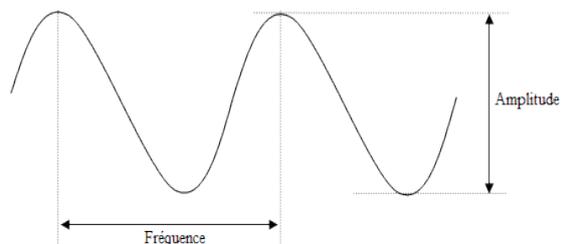
« Le son est une onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales. Par extension physiologique, le son désigne la sensation auditive à laquelle cette vibration est susceptible de donner naissance.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

La science qui étudie les sons s'appelle l'acoustique. La psychoacoustique combine l'acoustique avec la physiologie et la psychologie, pour déterminer la manière dont les sons sont perçus et interprétés par le cerveau. » (Wikipédia)

Ces ondes sont dues à une variation temporelle de pression dans un milieu homogène, air ou eau. Ce sont des ondes de compression. Elles agissent en comprimant et en dilatant le milieu dans la direction dans laquelle elles se propagent. Leur fréquence (= nombre de fois par seconde où l'on passe d'une surpression à une dépression en un point donné) se mesure en Hertz (Hz). L'amplitude d'une onde correspond à la valeur exprimée en Pascal (Pa), en Newton par mètre carré (N/m²) ou en décibels (dB) de la surpression ou de la dépression de l'air.

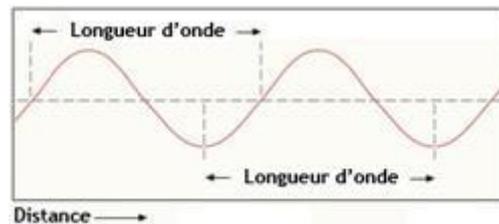


Ondes de fréquences différentes.
Celle du bas a la plus haute fréquence et celle du haut, la plus basse.



Lorsque des ondes de compression atteignent le corps humain, elles mettent les tympans en vibration. On donne le nom d'ondes sonores (ou sons) aux ondes de compression dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz (fréquences audibles par l'homme).

La longueur d'onde L est la distance qui sépare deux maximums successifs d'une onde lors de sa propagation. Elle est mesurée en mètres et est égale au rapport de la vitesse V (en m/s) par la fréquence F (en Hz) : $L = V/F$.



Les sons se caractérisent par leur amplitude, exprimée le plus souvent en dB(A). Cette amplitude est mesurée par un microphone, à un endroit précis par rapport à l'observateur. La lettre A indique que l'évaluation du bruit a été pondérée pour s'adapter à la courbe de sensibilité de l'oreille humaine.

Les sons sont aussi définis par leur fréquence, exprimée en Hertz (Hz) et qui est leur période de vibration (ex: 10 Hz = 10 périodes de vibrations par seconde).

Du point de vue physiologique, le son est une sensation auditive subjective qui dépend de celui qui l'entend. Il y a donc une part de subjectivité dans leur perception.

3.2. Infrasons

Les infrasons ont une fréquence inférieure à 20 Hz. Ils sont trop graves pour être perçus par l'oreille humaine (leur fréquence est trop basse). Au-delà de 20 kHz et en deçà de 20 Hz, notre oreille n'entend plus rien, mais nous pouvons ressentir ces sons avec notre corps (pulsations, pressions) et plus particulièrement avec notre cage thoracique.

Villey-Migraine (2004) et Renard (2005) précisent que des infrasons sont régulièrement produits par des événements naturels tels que le tonnerre, les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les avalanches, les aurores boréales. Les vagues de l'océan en produisent également mais à des fréquences très faibles (0,2-0,3 Hz).

Il existe de nombreuses sources artificielles d'infrasons : avions passant le mur du son, explosions, essais nucléaires. Dans notre vie courante également nous sommes régulièrement confrontés à des émissions d'infrasons: passages de camions, de motos ou de trains, claquements de portes, compresseurs, ventilateurs, climatiseurs, machine à laver le linge en phase d'essorage, etc.

Ces émanations d'infrasons sont la plupart du temps ponctuelles et passagères et leur éventuelle nocivité en est de fait réduite.

Lors de voyages en voiture, certaines personnes sont toutefois incommodées par les émissions d'infrasons (mal des transports).

L'exposition périodique et répétitive à des infrasons industriels (machines lourdes d'usines) semble par contre avoir des répercussions plus néfastes sur la santé.

Nous verrons plus loin ce qu'il en est des infrasons émis par les éoliennes.

La longueur d'onde des infrasons étant beaucoup plus grande que celle des sons, les infrasons sont moins retenus par les obstacles et peuvent se propager très loin (Le Pichon 2004).

Certains mammifères, comme les éléphants, les baleines et les girafes sont capables de percevoir ces infrasons à très grandes distances et les utilisent pour communiquer. Il a d'ailleurs été rapporté dans les media que lors du tsunami de 2005 en Thaïlande, des éléphants ayant perçu les infrasons du tremblement de terre sous-marin se sont enfuis vers les montagnes, entraînant avec eux et sauvant leurs cornacs et quelques touristes chanceux.

4. Nuisances dues aux sons produits par les éoliennes

4.1. Définitions

Le bruit est un son indésirable, qui dérange ou crée des dommages aux récepteurs (Rogers et al. 2002/2006, Villey-Migraine 2004).

Le dérangement occasionné par un bruit dépend de différents facteurs :

- Le niveau d'intensité, la fréquence
- Le niveau de bruit de l'environnement
- La configuration du terrain entre l'émetteur et le récepteur
- La nature du récepteur
- L'attitude du récepteur envers l'émetteur.

La sensibilité au bruit augmente si celui-ci est composé de sons de différentes fréquences.

Les effets du bruit sur les gens peuvent être classés en trois catégories (Rogers et al. 2002/2006) :

1. Les effets subjectifs, y compris agacement, insatisfaction, nuisance
2. L'interférence avec les activités (conversation, sommeil, apprentissage)
3. Les effets physiologiques (anxiété, acouphènes, atteintes auditives).

Du fait de la variabilité dans la tolérance au bruit d'une personne à l'autre, il est très compliqué de quantifier les effets du bruit ainsi que de le corréliser à des réactions d'agacement et d'insatisfaction.

Les principales préoccupations des riverains d'éoliennes industrielles sont liées à la production de sons lors du fonctionnement des machines.

La conséquence première des bruits liés aux éoliennes est la perturbation du sommeil (Kabès 2001, Pedersen et al. 2003/2004/2007/2008, 2009, Van den Berg et al. 2008, Bakker et al. 2009).

Les sons proviennent du système mécanique de l'éolienne ainsi que de la rotation des pales, notamment au moment du passage de la pale sur le mat.

4.2. Distance aux habitations

Des nuisances interviennent lorsque les turbines sont érigées trop près des habitations.

En Suisse, la distance minimale légale entre des habitations et des éoliennes est de 300 mètres. Elle a été définie dans le « Concept d'énergie éolienne Suisse » (2004) et se base sur les premières turbines érigées qui étaient de moindres dimensions.

Elle n'a pas varié depuis, alors même que les nouvelles générations d'aérogénérateurs n'entrent plus dans la même catégorie.

4.3. Niveau sonore

Dans son livre sur les éoliennes, Philippe Roch (2011) donne des indications intéressantes sur la législation suisse sur le bruit. Il écrit : « *Dans son principe, la loi suisse sur la protection de l'environnement (LPE) prévoit que le bruit doit être maintenu à un niveau tel que la population ne soit pas gênée* ».

Il cite également l'article 15 de la LPE : « *Valeurs limites d'immissions² relatives au bruit et aux vibrations. Les valeurs limites d'immissions s'appliquant aux bruits et aux vibrations sont fixées de façon que, selon l'état de la science et l'expérience, les immissions inférieures à ces valeurs ne gênent pas de manière sensible la population dans son bien-être* ». Et Roch de préciser que les ordonnances d'application de cette loi ne répondent pas à cet objectif, puisque selon l'Office fédéral de l'environnement, 64% de la population s'estiment dérangés par le bruit et que plus d'un million de personnes sont exposées à des nuisances sonores au-delà des valeurs limites (OFEV 2010).

La législation suisse sur le bruit fixe des valeurs limites d'exposition de la population au bruit. Trois niveaux sont définis (art. 13, 19 et 23 de la loi sur la protection de l'environnement) :

- les valeurs limites d'immissions (VLI) en dessous desquelles la majorité de la population ne devrait pas être sensiblement gênée dans son bien-être
- les valeurs limites de planification (VLP), inférieures aux VLI, qui concernent les zones encore non touchées par le bruit. De nouvelles installations, mêmes industrielles, doivent respecter ces VLP
- les valeurs limites d'alarme (VLA) destinées à signaler les situations dans lesquelles la majorité de la population est dérangée par le niveau de bruit.

Roch estime que les normes fixées ne tiennent pas assez compte du besoin de tranquillité puisqu'une partie de la population est gênée par le bruit, même lorsque les normes sont respectées. Il argue également qu'il manque dans la législation une définition claire d'un droit au silence pour les zones de repos.

Roch précise encore que l'ordonnance sur le bruit, dans son article 43, prévoit quatre zones de sensibilité au bruit, entre lesquelles les normes de bruit diffèrent :

- zone de sensibilité 1 : protection accrue contre le bruit (zones de détente)
- zone de sensibilité 2 : entreprises gênantes non autorisées (zones d'habitation, zones de constructions et d'installations publiques)
- zones de sensibilité 3 : entreprises moyennement gênantes admises (zones mixtes et zones agricoles)
- zones de sensibilité 4 : entreprises fortement gênantes (zones industrielles).

Si l'on suit la loi, des installations comme les éoliennes, implantées dans des zones de détente (forêts, zones naturelles) ne devraient pas exposer les personnes à des valeurs d'exposition supérieures à 40 dB la nuit et 50 dB le jour. En zones de sensibilité 2, ces valeurs sont de 45 dB la nuit et 55 dB le jour. En zone agricole, 55 dB la nuit et 60 dB le jour (afin de ne pas empêcher l'utilisation, limitée dans le temps, des machines agricoles).

² Le terme « immission » désigne le bruit au niveau de la personne qui le reçoit, alors qu' « émission » désigne le bruit au niveau de la source du bruit.

Pour le moment, dans le Jura, les éoliennes sont essentiellement implantées en zones agricoles et les mesures de bruit effectuées sur le lieu d'émission par les développeurs montrent que les normes sonores légales sont respectées. Mais de nombreux exemples, en Suisse comme à l'étranger, montrent que les valeurs prises au lieu d'immission devraient souvent être augmentées de plusieurs dB avant d'être confrontées aux valeurs légales. La topographie du terrain, la nature du sol et le lieu d'implantation jouent un rôle non négligeable et rendent invalide une application unilatérale de la loi.

4.4. Sons produits par les éoliennes

Les éoliennes produisent des bruits mécaniques et aérodynamiques. Leurs niveaux sont mesurables, mais la définition de leur impact sur les riverains est relativement subjective.

4.4.1. Bruits mécaniques

Ce sont essentiellement des bruits liés à la transmission et à l'alternateur. Actuellement, ils ont été réduits de manière significative grâce à une technologie améliorée (insonorisation de la nacelle, modification ou suppression des engrenages, arbres de transmission montés sur des coussinets amortisseurs, etc).

Le bruit produit par une éolienne atteint 120 dB au niveau de la nacelle (bruit d'une discothèque) et, selon les constructeurs, jusqu'à 45 dB à 300m (bruit dans un bureau). D'autres facteurs comme le nombre d'éoliennes, la topographie, le bruit ambiant jouent aussi un rôle non négligeable.

Si les progrès technologiques ont permis de réduire le bruit mécanique des éoliennes, le fait que les turbines soient de plus en plus puissantes et de plus en plus hautes réduit notablement ces améliorations. Plus le son est produit haut, où les obstacles sont moindres, mieux il se propage...

4.4.2. Bruits aérodynamiques

Ces bruits sont causés par les irrégularités du flux d'air autour des pales et par les changements de vitesse du vent. Ils sont importants et ne peuvent pas être supprimés. A des vitesses ne dépassant pas 15 m/s, les pales émettent le même genre de bruit qu'un planeur (appelé « swish » en anglais). Des vitesses plus élevées créent des turbulences autour des pales qui émettent alors des bourdonnements.

De surcroît, à chaque passage de la pale sur le mat, un "wouf" est émis.

Dans les régions où les vents ne sont pas constants (comme sur les crêtes jurassiennes), les bruits varient avec les rafales ce qui accentue leur caractère désagréable.

Les sons ne se propagent pas de façon rectiligne et uniforme. Ils suivent des trajectoires dépendant de la topographie. Ainsi, lorsque les vents sont forts sur une crête et faibles dans la vallée protégée en contrebas, les bruits émis par les éoliennes ne s'entendent pas ou peu sur la crête mais par contre fortement dans la vallée (jusqu'à plus de 1000 mètres de distance).

De plus, la propagation diffère entre le jour et la nuit où elle est plus élevée (Van den Berg 2004), ce qui occasionne un maximum de bruit.

Il résulte de ce qui précède que les mesures théoriques préalables effectuées par les promoteurs ne se retrouvent pas forcément dans la réalité.

Les bruits émis par les éoliennes sont caractérisés par un large spectre de fréquences et une forte variation d'amplitudes, ce qui les rend particulièrement gênants (EMPA 2010).

Les grandes éoliennes produisent beaucoup de sons de basse fréquence dont certains se rapprochent des fréquences cardiaques. De nombreuses personnes sont très sensibles à ces sons (Vasudevan 1977) qui sont surtout perceptibles dans des environnements calmes (zones rurales et suburbaines), parfois à l'intérieur des habitations alors même qu'ils sont imperceptibles à l'extérieur. Ces bruits (pulsations, roulements) sont davantage audibles de nuit que de jour.

Les mesures généralement effectuées (avec pondération A) ne prennent pas ces sons en considération alors même qu'ils sont plus dérangeants pour les gens que les sons de plus hautes fréquences (Leventhall 2004).

Pedersen et al. (2004/2007) ont aussi montré que le bruit des éoliennes est plus ennuyant pour les gens que des bruits équivalents provenant d'autres sources (trafic routier, aéroport).

Il apparaît également que le fait de voir les éoliennes aggrave le sentiment de dérangement des riverains, alors que l'attitude positive ou négative des sujets vis-à-vis des éoliennes a une corrélation directe avec leur degré d'insatisfaction. C'est ainsi que les études menées en Suède par Pedersen et al. ont montré que des éoliennes situées à proximité d'habitations dérangent peu les habitants lorsque ceux-ci étaient propriétaires des machines (il faut toutefois préciser qu'ils avaient la possibilité de les arrêter lorsqu'elles devenaient trop dérangeantes, notamment la nuit...)

5. Nuisances dues aux infrasons produits par les éoliennes

En plus des sons de différentes fréquences, il est largement admis que les turbines à vent industrielles émettent des infrasons qui sont parfois détectables à plusieurs kilomètres (Van den Berg 2006, Sugimoto et al. 2008, Jung et al. 2008). Ceux-ci sont causés par la rotation des pales qui créent des ondes en passant devant le mat (Legerton et al. 1996). La fréquence de ces infrasons varie selon la vitesse de rotation des pales de l'éolienne et en fonction de la présence ou non d'obstacles. Dans certains cas, le mat de l'éolienne lui-même pourrait également engendrer des infrasons en se mettant en résonance.

Les humains n'entendent pas les infrasons au sens strict du terme, mais ils pourraient les ressentir de diverses façons (Hubbard et al. 1991, Salt 2004, Van den berg 2004/2005, Renard 2005, Styles et al. 2005). La première mention de malaises suite à une exposition de l'homme aux infrasons remonte à la fin des années soixante (Gavreau et al. 1966). L'auteur y décrit une sorte de mal de mer accompagné de céphalées, de nausées et de vertiges avec également des troubles visuels et des difficultés de concentration. Brüel et al. (1973) expliquent que le mal des voitures est dû à des infrasons (amplitude de 1 Pa pour une fréquence entre 4 et 16 Hz). Takigawa et al. (1991) montrent que des infrasons (amplitude de 1 Pa pour des fréquences situées entre 3 et 7 Hz) agissent sur l'oreille interne et entraînent un nystagmus (mouvement d'oscillation involontaire et saccadé du globe oculaire), des

tremblements et des difficultés respiratoires. Fraiman et al. (1993) signalent quant à eux l'influence d'infrasons à 2 Pa sur la tension artérielle.

Il est intéressant de constater que le professeur Claude Renard parle déjà des infrasons comme d'une nuisance en 1997, lors d'une conférence intitulée « Les infrasons, pollution discrète et pernicieuse ». Cette conférence faisait écho à des inquiétudes soulevées dans la population française par la mise sur le marché en Suède d'une arme à infrasons destinée à réfréner les émeutiers. A cette époque, on parlait aussi beaucoup du « mal des bureaux » apparemment dû aux infrasons émis par les systèmes de climatisation. De plus, les éoliennes commençaient à faire parler d'elles en Bretagne. Renard reprendra cette notion dans un article remis à jour en 2005, désirant informer le public « sur ces bruits inaudibles mais nocifs » (Renard 2005).

5.1. Perception des infrasons

A ce stade, il devient nécessaire de faire le point sur la perception ou non des infrasons par l'être humain et donc sur la nécessité ou non de prendre en compte ce type de sons. Il faut savoir que lors de mesures de bruits effectuées à proximité d'éoliennes par l'industrie du vent, les techniciens utilisent généralement des sonomètres standards et n'enregistrent que les sons dont la fréquence est supérieure à 20Hz. Enregistrer des sons en-deçà de 20 Hz nécessite un appareillage beaucoup plus complexe et un personnel qualifié (acousticiens).

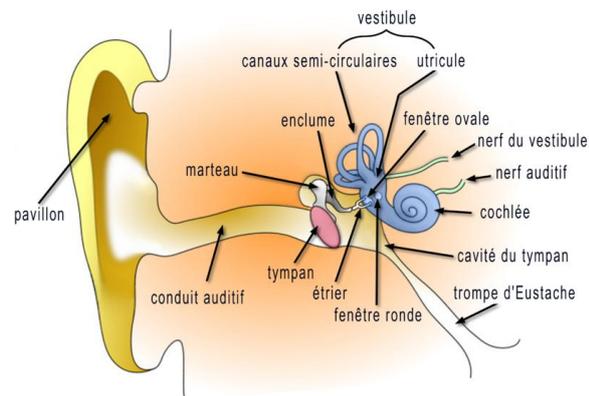
Certains chercheurs, partant du fait que les infrasons sont hors de portée pour l'oreille humaine, arguent que ceux-ci sont sans dangers pour la santé. « If you can't hear a sound... it doesn't affect you », que l'on pourrait traduire par « Ce qui ne s'entend pas ne peut pas nuire ». On retrouve cette idée notamment dans un rapport de l'Académie nationale française de médecine en 2005, chez Rogers (2006) et chez Colby et al. (2010).

D'autres chercheurs (Hubbard 1991, Rapport du WHO 1999, Villey-Migraine 2004, Renard 2005, Salt 2010) mettent en garde voire prétendent le contraire. Salt, particulièrement, fait référence aux autres sens que l'ouïe pour illustrer sa théorie selon laquelle ce qui ne se perçoit pas consciemment peut tout de même avoir des répercussions sur la santé. Il dit notamment :

- Peut-on sentir le goût des salmonelles dans un aliment? Non. Et pourtant, si on en ingère, on va tomber malade.
- Peut-on sentir le monoxyde de carbone dans l'air ambiant? Non. Pourtant, si on en inhale, on risque de mourir.
- Peut-on voir les rayons UV dans la lumière du soleil? Non. Pourtant, si on y est exposé, on risque des brûlures graves.

Dans leur article intitulé « Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines » (2010), Salt et al. exposent différentes pistes selon lesquelles les sons de basse fréquence, à des niveaux auxquels ils peuvent être entendus ou non, sont capables d'influencer le fonctionnement de l'oreille interne. L'équipe de Salt travaille dans un laboratoire qui étudie le fonctionnement de l'ouïe et la physiologie des fluides de la cochlée. A ce titre, elle utilise fréquemment des infrasons pour ses expériences.

5.2. Rappel anatomique



(Source iconographique: Wikipedia)

L'oreille interne contient la cochlée qui est l'organe de l'ouïe ainsi que le vestibule (canaux semi-circulaires et utricule) qui est responsable de l'équilibre.

La cochlée est creuse et remplie d'un liquide appelé endolymphe. Elle est tapissée de cellules sensorielles ciliées, non renouvelables.

Les cils de ces cellules sont mis en mouvement par les vibrations transmises au travers de l'oreille médiane, vibrations répercutées à l'endolymphe par le tympan. Les mouvements des cils sont ensuite transformés en signaux nerveux par le nerf auditif et amenés au cerveau qui va les interpréter comme des sons. Il est communément admis que les cellules ciliées les plus proches de l'entrée de la cochlée servent à amplifier les vibrations des hautes fréquences (sons aigus) alors que les cellules situées dans le dernier tour de la cochlée réagissent aux basses fréquences. Toutefois, Salt et al. (2010) affirment que les cellules les plus externes de la cochlée, en plus d'amplifier les vibrations de hautes fréquences, servent aussi à neutraliser mécaniquement les vibrations de très basses fréquences (infrasons) afin que l'oreille humaine ne puisse pas les entendre. Ceci représenterait une forme de suppression active de bruit. Ces cellules ne sont pas insensibles aux infrasons. Elles les perçoivent puis les annulent. Le cerveau ne se rend compte de rien.

Les cellules les plus externes de la cochlée sont stimulées par des sons de fréquence très basse, à plus de 40 dB au-dessous du niveau audible (Salt et al. 2010). Par conséquent, si l'on admet que les éoliennes émettent à la fois des sons et des infrasons, les études qui se focalisent sur des mesures de sons dans le domaine des fréquences audibles seulement ne donnent pas une représentation valide de l'impact potentiel sur l'humain. Ces mesures ne montrent qu'une chose : le bruit audible produit par les éoliennes, au vu du nombre de décibels mesurés, n'est une source de problèmes « que » pour les habitations situées trop près. Mais la façon habituelle de mesurer ces bruits n'est pas adéquate car elle ne tient pas compte des infrasons.

Salt utilise à nouveau une image simple pour illustrer son propos : juger de l'impact du bruit des éoliennes en utilisant des techniques ne permettant de mesurer que des sons audibles revient à vouloir estimer la quantité de moutarde dans un hamburger en ne quantifiant que le ketchup !

Il montre que ces cellules de la cochlée sont stimulées chez certaines personnes par des infrasons de niveaux correspondant à ceux générés par les éoliennes. Ces infrasons ne sont pas « entendus » au sens habituel du terme mais ils sont capables

d'induire des perturbations chez ces personnes. En présence continue d'infrasons, les cellules ciliées concernées travaillent sans arrêt.

Ceci pourrait être mis en relation avec les désagréments ressentis par les personnes vivant à proximité d'éoliennes industrielles.

5.3. Oreille interne et équilibre

Le vestibule et les canaux semi-circulaires (au nombre de trois et disposés orthogonalement dans les trois plans) sont également remplis d'endolymphe et tapissées de cellules ciliées. Lorsque la tête change de position, ce liquide transmet le mouvement aux cellules ciliées. La disposition dans l'espace des canaux semi-circulaires permet de détecter des mouvements dans toutes les directions, d'informer le cerveau et d'ajuster la posture du corps pour garder l'équilibre (voir chapitre 7). Ces récepteurs jouent aussi un rôle important dans le phénomène des vertiges.

5.4. Infrasons et santé

Dans son dossier « Eoliennes, sons et infrasons: effets de l'éolien industriel sur la santé des hommes », le Dr Marjolaine Villey-Migraine confirme les effets négatifs des infrasons sur la santé humaine. Elle cite notamment les articles de Møller (1984, 2002) publiés dans le Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control ainsi que des recommandations émises par la NASA. Elle écrit : « *Les risques de maladies vibro-acoustiques sont connus chez les pilotes d'avion à réaction et les cosmonautes. La NASA limite l'exposition aux infrasons de ses pilotes dans les engins spatiaux au seuil de 24 h à 120 dB (pour des fréquences de 1 à 16 Hz) pour que son personnel reste indemne. Il peut persister cependant des réactions visuelles et des troubles du système circulatoire à ces amplitudes, même si les sujets sont en parfaite santé.*

Des dizaines d'études expérimentales effectuées dans le monde industriel et en laboratoire sur les hommes et les animaux mettent aussi en évidence et confirmant ces troubles de comportement, et les changements physiologiques suivants: augmentation de la pression artérielle, changement du rythme respiratoire et troubles d'équilibre, après des expositions brèves (5 à 50 mn), à des niveaux de pression sonore de 90 à 120 dB (fréquences : 7 à 16 Hz).

A des expositions prolongées (45,60 jours), chez le rat, à la fréquence de 8 Hz, on observe des changements biochimiques et morphologiques des tissus. Les effets observés sont plus prononcés à des fréquences plus hautes.

A des durées d'exposition plus longues (4 mois, par exemple) certains effets négatifs sur la santé sont irréversibles.

En fait de l'amplitude des infrasons dépendent la nature des troubles sur la santé.

Si vous combinez forte amplitude et fréquence élevée, autour de 16 à 17 Hz. »

Villey-Migraine précise que des troubles existent également à des amplitudes et à des fréquences beaucoup plus faibles, s'apparentant plus aux infrasons émis par les éoliennes et propagés à de longues distances.

C'est ainsi que des expositions de 6 à 16 Hz à 10 dB sont corrélés à des troubles de vigilance et de sommeil (Landstorm et al. 1984).

A moins de 20 dB, des sujets exposés aux infrasons souffrent de désagrément et ressentent une pression dans les tympans. Leur système cardio-vasculaire ainsi que leurs performances restent inchangés (Møller 1984).

Des infrasons à 10, 20, 40 et 60 Hz subis par des sujets pendant leur sommeil modifient l'organisation de celui-ci (Okada et al. 1990).

Et Villey-Migraine de conclure : «*La plupart des études expérimentales de la littérature scientifique sont faites en laboratoire, sur des périodes très courtes; on obtient dans une très forte majorité des cas des effets néfastes sur la santé, qui augmentent en fonction de la pression sonore et de la bande de fréquence des infrasons. On sait aussi que plus l'exposition est prolongée, plus l'émission est nocive* (Harris 1991) ».

6. Eoliennes et santé humaine

En consultant les sites et les blogs d'opposants aux éoliennes industrielles, partout dans le monde, en consultant les pages dédiées aux nuisances sonores et à leurs conséquences sur les personnes, on relève toujours les mêmes symptômes physiques et psychiques.

6.1. Le rapport Pierpont

Ces symptômes ont été listés et regroupés sous la terminologie de **syndrome éolien** par le Dr Nina Pierpont (2009) dans un livre intitulé « Wind Turbine Syndrome – A Report on a Natural Experiment ». Cet ouvrage est rapidement devenu la référence et le fer de lance dans la lutte des personnes touchées par les éoliennes industrielles, sur tous les continents. Une version abrégée, destinée aux non médecins a été traduite en huit langues et la version américaine d'origine a été tirée à des milliers d'exemplaires.

Encensée par certains pour avoir mis des mots sur les souffrances jusqu'alors non reconnues de riverains d'éoliennes industrielles, Nina Pierpont est aussi dénigrée par d'autres (proches à différents titres des milieux de l'industrie du vent) qui lui reprochent une approche trop peu scientifique et un travail non cautionné par des référents.

On peut certes lui reprocher de ne pas avoir publié ses résultats dans une revue scientifique renommée, gage d'un travail reconnu. Ce choix s'explique en partie par la longueur de l'étude et la difficulté à la scinder en plusieurs articles qui seraient publiés séparément, avec le risque de nuire à l'unité du travail effectué. On retrouve d'ailleurs ce problème dans de nombreuses thèses de doctorat, qui bien que non publiées constituent une importante source de connaissances dans des domaines souvent très pointus.

Pierpont semble aussi avoir choisi ce moyen de diffusion pour donner accès à ces observations à un maximum de gens, y compris des non-scientifiques (un chapitre particulier leur étant réservé).

Contrairement à ce qui a été dit, la valeur de son travail est attestée par les appréciations de plusieurs référents, dont certains sont d'éminents scientifiques, qui s'expriment en début du livre.

On pourrait également lui reprocher sa méthodologie. Elle a utilisé une série de cas en tant que protocole de recherche. C'est-à-dire qu'elle a fait un compte-rendu descriptif d'une série d'individus présentant le même problème médical. Ceci sans utiliser de groupe de témoin pour comparaison. Elle a toutefois collecté ses informations de manière à pouvoir faire des comparaisons (voir plus loin).

Nina Pierpont est consciente de ces « faiblesses » et elle aborde ce sujet dans son livre. Elle incite d'ailleurs le monde scientifique à continuer des études dans le même domaine, peut-être avec plus de moyens financiers et humains. Elle émet notamment le souhait que des études épidémiologiques soient entreprises mais met en avant la

difficulté de ce genre d'études dans le domaine des éoliennes : choix et taille des populations étudiées (exposées et non exposées), choix du moyen d'investigation (questionnaire ou entretien), etc.

Le travail du Dr Pierpont commence à être reconnu dans le monde scientifique et à apparaître dans les bibliographies d'auteurs renommés dans le domaine de l'acoustique et des éoliennes (Hanning 2009, 2010, Stelling et al. 2010).

En octobre 2010, Pierpont a été l'intervenante principale au « First International Symposium on Adverse Health Effects and Industrial Wind Turbines », à Picton (Ontario, Canada).

6.2. Etudes convergentes

D'autres médecins ailleurs dans le monde (Dr Sara Laurie en Australie, Dr Robert McMurtry et Dr Noel Kerin au Canada, pour n'en citer que quelques-uns), arrivent aux mêmes conclusions que le Dr Pierpont. Toutefois, leurs observations n'ont pas encore fait l'objet de rapports circonstanciés ou d'articles publiés dans des revues spécialisées.

Plusieurs études scientifiques sont toutefois en cours actuellement ou sont en attente de publication (Laurie et al. 2011, Hanning 2011, Nissenbaum 2010, 2011) et de fait pas encore disponibles dans le domaine public. C'est le cas de l'étude clinique du Dr Michael Nissenbaum qui s'est concentré sur deux sites éoliens dans le Maine. Il montre notamment qu'il existe une corrélation entre la distance habitations-éoliennes et les problèmes de santé des résidents (troubles du sommeil, dépression).

Il ne faut en effet pas perdre de vue que les problèmes de santé humaine liés aux éoliennes industrielles est un sujet émergent et qui va aller en se développant ces prochaines années.

Il est important aussi de signaler que de plus en plus d'acousticiens indépendants de l'industrie du vent commencent à s'intéresser à ce domaine (Dr Bob Thorne Australie, Rick James USA, George Kamperman USA, Dr Daniel Shepherd Nouvelle Zélande) et que de nouvelles études verront bientôt le jour.

7. Le syndrome éolien (en anglais : WTS pour « Wind Turbine Syndrome)

7.1. Définition et symptômes

Un syndrome est un ensemble de signes cliniques et de symptômes qu'une personne est susceptible de présenter lors de certaines maladies, ou parfois dans des circonstances particulières, pathologiques ou non (d'après Wikipedia).

Symptômes pris en considération dans le syndrome éolien :

1. troubles du sommeil
2. maux de tête
3. acouphènes (bourdonnements ou tintements dans les oreilles)

4. sensation d'augmentation de la pression à l'intérieur de l'oreille
5. vertiges (vertiges, étourdissements et sensations d'évanouissement)
6. vertige (sensation du corps ou de la pièce qui tourne)
7. nausées
8. troubles de la vue
9. tachycardie (accélération des battements du cœur)
10. irritabilité
11. problèmes de concentration et de mémoire
12. angoisses associées à des sensations de palpitations ou de frémissements internes, surgissant pendant l'éveil ou le sommeil.

Le premier médecin à avoir décrit cet ensemble de symptômes, sans mettre de nom dessus, a été le Dr Amanda Harry, une généraliste anglaise, après que plusieurs de ses patients lui aient parlé de nouveaux problèmes de santé apparus après l'implantation d'éoliennes industrielles près de leur village de Cornwall (Harry 2007). A l'autre bout du monde, un généraliste australien, le Dr David Iser documenta le même type de cas, suivi par le Dr Robert McMurtry en Ontario, au Canada. Leurs observations seront par la suite confirmées et codifiées par le Dr Nina Pierpont.

7.2. Méthode

Dans son livre, Pierpont étudie les cas individuels des membres de dix familles (38 personnes) vivant à proximité d'éoliennes industrielles et dont les symptômes se sont développés après la mise en service des éoliennes.

L'état de santé des personnes examinées, avant et pendant l'exposition aux turbines, ainsi qu'après qu'ils aient quitté leur maison à cause des problèmes médicaux d'un ou de plusieurs membres de la famille a été méticuleusement enregistré.

Pierpont décrit l'ensemble des symptômes qui se sont développés ou ont été exacerbés durant la période d'exposition aux turbines et qui ont disparu lorsque les sujets ont quitté leur maison. Ses symptômes sont réapparus lorsqu'ils sont revenus dans leurs habitations.

Elle a ensuite comparé les personnes qui présentaient ces symptômes spécifiques à ceux qui n'en avaient pas, en considérant l'âge et l'état de santé antérieur, afin de mettre en évidence d'éventuels facteurs de risque médical.

7.3. Epidémiologie

L'apparition des symptômes n'est pas immédiate. Il faut séjourner un certain temps à proximité des éoliennes pour qu'ils surviennent. Les personnes en visite sur les lieux durant quelques heures ne sont pas incommodées.

Les enfants sont affectés, de même que les adultes et plus particulièrement les adultes plus âgés.

Les personnes sujettes aux migraines ou présentant une sensibilité au mouvement accrue (mal des transports, mal de mer), de même que celles dont l'oreille interne présente des dommages antérieurs à l'exposition (par exemple perte d'audition due

à une exposition au bruit industriel) sont particulièrement vulnérables à ces symptômes.

Par contre, les personnes présentant des problèmes d'anxiété ou des problèmes de santé mentale ne sont pas plus affectées que les autres, contrairement à ce qui est affirmé dans la littérature de l'industrie du vent (Colby et al. 2010).

Il est intéressant de noter que toutes les personnes vivant à proximité d'éoliennes ne développent pas les symptômes recensés dans le syndrome éolien. Mais l'échantillon n'est pas assez grand pour établir le pourcentage de personnes atteintes ni définir à quelle distance des éoliennes se manifeste le syndrome.

7.4. Résultats

Pierpont obtient les résultats simplifiés suivants (pour plus de détails, références, valeurs statistiques et analyse des facteurs de risque, voir Pierpont 2009) :

- 1) La très grande majorité des personnes étudiées présentaient des troubles du sommeil avec cauchemars, réveils nocturnes en état d'alerte, nécessité de se lever pour uriner chez les adultes, énurésie pour les enfants (disparaissant loin des éoliennes)
- 2) Plus de la moitié des sujets ont vu leur maux de tête se multiplier et s'aggraver
- 3) Les acouphènes étaient le symptôme dominant
- 4) Un phénomène apparemment non encore décrit en médecine est apparu. Pierpont le nomme « Visceral Vibratory Vestibular Disturbance VVVD » (« perturbation vestibulaire viscérale due aux vibrations »). Ce symptôme recouvre diverses manifestations comme une sensation de pulsation ou de vibration interne, des tremblements, de la nervosité ou de l'agitation, voire de la peur avec désir de fuite, de la tachycardie et des nausées. Ces symptômes évoquent ceux d'une crise d'anxiété avec sensation de mouvements à l'intérieur de la cage thoracique. Ils étaient fortement corrélés à une sensibilité au mouvement préexistante (personnes malades en voiture ou souffrant du mal de mer par exemple). Quatorze des vingt et un adultes de l'étude présentaient le VVVD.
- 5) Les problèmes de concentration et de mémoire étaient omniprésents. Ils étaient liés à une perte générale d'énergie et de motivation, à une perte de compétences de base (présentes avant l'exposition) ainsi qu'à des problèmes dans le travail scolaire des enfants qui n'existaient pas avant l'exposition. La privation de sommeil jouait certainement un rôle dans ces problèmes mais l'influence du VVVD est également évoquée.
- 6) L'irritabilité et la colère concernaient la plupart des sujets, enfants compris (perte de sociabilité, difficultés d'intégration).
- 7) Une fatigue persistante liée à une perte de plaisir et de motivation pour les activités habituelles était manifeste.

- 8) D'autres symptômes tels qu'infections respiratoires inférieures inhabituelles (bronchites, pneumonies, pleurésies), asthme aggravé, sérosités ou infections inhabituelles dans l'oreille moyenne, accidents vasculaires oculaire étaient présents également. Leur éventuelle relation avec les éoliennes nécessiterait d'autres moyens d'étude.

7.5. Discussion des résultats

Dans la discussion de ces résultats³, Pierpont mentionne qu'elle fait un rapprochement entre le syndrome éolien et un syndrome neurologique bien connu, le vertige migraineux. Elle tire également un parallèle avec des symptômes similaires qui se retrouvent dans un problème de l'oreille interne, l'hydrops endolymphatique (HE). L'HE est caractérisé par des étourdissements et des problèmes auditifs qui sont parfois associés à des difficultés de mémoire à court terme, de concentration, de polyvalence, d'arithmétique et de lecture. S'y rajoutent aussi dans certains cas des troubles du sommeil, des maux de tête et des déficiences de compétences basiques.

Et Pierpont de dire : « Cela ressemble au syndrome éolien sans les éoliennes ».

L'hydrops endolymphatique induit également une sensation de remplissage ou de pression des oreilles, symptôme qui se retrouve fréquemment chez les sujets de l'étude.

Ceci amène Pierpont à évoquer le fonctionnement du système de l'équilibre (gestion du maintien de la posture verticale, conscience des mouvements et de la position). Selon elle, les personnes atteintes d'un déséquilibre de ce système sont plus sensibles au syndrome éolien.

Ce système tire ses informations de quatre sources (ou canaux d'équilibre) :

- les yeux
- le système vestibulaire de l'oreille interne
- les récepteurs sensibles aux mouvements du corps et les récepteurs du toucher
- les récepteurs de pression et d'étirement des organes de la cage thoracique et de l'abdomen (gravicepteurs viscéraux) (Mittelstaedt 1996, 1999).

Pour fonctionner correctement, le système de l'équilibre doit recevoir des informations fiables d'au moins deux des trois premiers canaux.

Dans le cas de personnes sensibles vivant à proximité d'éoliennes industrielles, ces canaux pourraient être perturbés par différentes causes :

- des bruits de basse fréquence peuvent induire une perturbation du vestibule de l'oreille interne, ce qui produit une illusion de mouvement ou une instabilité (Todd et al. 2008)

³ Le rapport de Pierpont contient de très nombreuses références scientifiques dont seules quelques-unes sont reprises ici, par souci de simplicité et de lisibilité. Pour une lecture plus scientifique, on peut se référer au texte original (Pierpont 2009).

- l'effet stroboscopique dû au passage des pales devant le soleil peut conduire à une perturbation visuelle
- des vibrations anormales du sol ou de l'air peuvent envoyer des signaux anormaux aux récepteurs de mouvements et pourraient également influencer les gravicepteurs viscéraux, en lien avec le VVVD (von Gierke et al. 1994).

Pierpont va plus loin et montre comment une perturbation du système vestibulaire peut être reliée à des symptômes particuliers du syndrome éolien, comme les crises de panique et les problèmes de réflexion et de mémoire.

Le système de l'équilibre est neurologiquement lié à la peur et à l'angoisse, de même qu'aux réflexes involontaires tels que rythme du cœur, transpiration, nausées (Balaban 2001, 2002, Furman et al. 2001, Halberstadt et al. 2003). Une perturbation de ce système peut conduire à la peur et à des réactions physiques comme la tachycardie (Yates et al. 1999).

D'autre part, il a été récemment démontré que les nerfs du système vestibulaire étaient reliés à l'hippocampe, structure du cerveau impliquée dans les phénomènes de mémoire et d'apprentissage spatial (Brandt et al. 2005, Hanes et al. 2006, Dieterich et al. 2008). Il en découle qu'un signal perturbé en direction de l'oreille interne diminue la mémoire spatiale ainsi que l'efficacité et la précision de la réflexion spatiale (= la concentration).

De telles manifestations se retrouvent chez les sujets de l'étude de Pierpont (ne pas se souvenir de ce que l'on est venu acheter au magasin, difficultés subites à lire, oubli de faits mathématiques pourtant acquis, incapacité à suivre l'intrigue d'une série TV, etc.).

L'interférence du bruit avec la lecture ou l'apprentissage des enfants n'est plus à prouver, ni son effet sur la réflexion des adultes, et ceci à des niveaux d'intensité bien inférieurs à ceux endommageant l'ouïe. La présence de composantes de basse fréquence aggrave encore cet impact (Evans et al. 1997, Haines et al. 2001, Lercher et al. 2003, Clark et al. 2005, Evans 2006).

Les effets des bruits environnementaux nocturnes (même à des niveaux de bruits relativement faibles) sur le sommeil, le stress, la pression sanguine et les risques cardio-vasculaires sont aussi très bien documentés, tout comme le lien avec la dégradation de la mémoire et les difficultés d'apprentissage. Tous ces phénomènes se retrouvent dans les témoignages des sujets de l'étude de Pierpont.

De plus, plusieurs études montrent qu'en présence de bruits de basse fréquence, les symptômes et le degré à partir duquel les personnes sont gênées augmentent au fil du temps et qu'il n'y a pas d'habituation (Edge et al. 1966, Berglund et al. 1996, Feldmann et al. 2004, Findheis et al. 2004, Persson 2004).

Une étude suédoise met en évidence le fait que la gêne occasionnée par une éolienne est plus problématique que celle générée par la circulation routière, aérienne ou ferroviaire, indépendamment du nombre de décibels mesurés (Pedersen et al. 2004/2007). Une autre étude aux Pays-Bas arrive aux mêmes conclusions (Van den Berg et al. 2008).

7.6. Les cas australiens

En Australie, où les parcs éoliens connaissent un énorme développement, le Dr Sara Laurie a retrouvé les symptômes du syndrome éolien chez une soixantaine de ses patients, alors même que ceux-ci ne connaissaient pas le syndrome éolien et n'avaient pas fait le lien entre leurs maladies et les éoliennes (Laurie 2011). Laurie elle-même, bien qu'ayant entendu parler du livre de Pierpont ne l'avait pas encore lu quand elle a fait l'anamnèse des trente premiers patients présentant ces symptômes. Ce n'est qu'en tenant un journal de leurs maux que ces personnes ont pu par la suite faire le lien avec les éoliennes.

Elle a constaté que tous les riverains d'éoliennes n'étaient pas affectés de la même manière et que certains parcs éoliens avaient plus d'effets négatifs que d'autres.

Tous les symptômes n'étaient pas réversibles lorsque l'exposition cessait. Les personnes les plus atteintes étaient les enfants et les personnes âgées.

Certaines personnes atteintes vivaient dans un rayon pouvant aller jusqu'à 10 km de la plus proche éolienne. Laurie signale que des acousticiens indépendants lui ont confirmé que des éoliennes placées sur des crêtes peuvent générer des sons et des infrasons pouvant se déplacer à des kilomètres, notamment par temps couvert ou lors d'inversion de températures.

Le Dr Laurie a participé au récent symposium international sur l'énergie éolienne et la santé à Picton en Ontario en 2010. Elle y a côtoyé des chercheurs clés dans le domaine, tels que les Dr Hanning, Salt et Nissenbaum. Et bien que son travail ne fasse pas pour le moment l'objet de publications référencées, elle a acquis une crédibilité notable.

Laurie a étendu ses recherches à d'autres régions d'Australie, en collaboration avec de nombreux collègues, spécialement dans les zones rurales, là où les fermes éoliennes prolifèrent. Partout les mêmes symptômes apparaissent après que les turbines aient été mises en service. Le délai d'apparition des symptômes varie d'un cas à l'autre, de quelques semaines à plusieurs mois, avec une aggravation au fil du temps. Souvent, les gens ne se rendent compte à quel point ils se sentaient mal qu'après s'être absentes quelques temps (> 1 semaine). Lorsqu'ils rentrent chez eux, ils constatent le retour de leur mal être et prennent conscience des symptômes.

Comme dans l'étude de Pierpont, Laurie constate que les patients présentant des affections préexistantes telles que migraines, hypertension, acouphènes, voient celles-ci aggravées quand ils sont exposés aux éoliennes. Ce phénomène est également retrouvé lors d'expériences de laboratoire étudiant l'effet des infrasons (Perrson et al., Qibai et al.).

Plus les gens ont été exposés longtemps aux éoliennes, plus leurs symptômes mettront du temps à disparaître lorsqu'ils auront déménagé. Certains symptômes ne disparaissent pas, même après un an (hyperacousie, acouphènes, problèmes de mémoire).

Récemment, en Australie et au Canada, de multiples cas d'angines, d'asthme et d'attaques cardiaques (sans antécédents ou prédispositions) s'étant produits lorsque les turbines tournaient ont été rapportés. Pierpont en mentionne également dans son rapport. Ces cas semblent liés à un stress intense mais demandent encore à être documentés.

7.7. Effet nocébo et troubles somatoformes

L'effet nocébo est une aggravation de la santé mentale ou physique, basée sur la crainte ou la croyance en des effets nocifs (contraire de l'effet placebo). Parmi les réactions les plus fréquentes, Colby et al. (2010) signalent des troubles du rythme cardiaque, de la somnolence, des nausées, de la fatigue, de l'insomnie, des maux de tête, de la faiblesse, des étourdissements, des troubles gastro-intestinaux, de la difficulté à se concentrer (Sadock 2005).

Les troubles somatoformes sont des symptômes physiques qui sont le reflet d'états psychologiques. Ils ne proviennent pas de causes physiques. Le plus courant des troubles somatoformes est le trouble de conversion. Il transforme le stress et l'anxiété en symptômes physiques.

Les symptômes exprimés dans l'effet nocébo et dans le trouble de conversion ressemblent beaucoup à ceux du syndrome éolien. Colby et al. mettent en avant l'importante couverture médiatique accordée aux effets nocifs des éoliennes sur la santé et le risque qui en découle que certaines personnes puissent développer des craintes anticipées, du stress et de l'hyper-vigilance qui pourraient empirer ou même créer des problèmes qui n'existeraient pas autrement.

Que faut-il en penser ? Ceci pourrait se concevoir chez certains adultes très sensibles et influençables, mais comment le justifier chez des enfants en bas âge qui ne sont pas à même d'appréhender la situation ? De plus, il n'existe pas d'études ou d'expérimentations allant dans ce sens, hormis la mention qui en est faite par Colby et al. dans leur rapport mandaté par l'AWEA et la CWEA.

A ce sujet, le Dr Laurie mentionne que beaucoup de ses patients ont soutenu les projets d'implantation d'éoliennes et que certains ont même travaillé sur les chantiers. Ils ne sont donc pas a priori des candidats à ce genre de manifestations psychologiques. Pour elle, la mention de l'effet nocébo est une partie de la « culture of victim blaming » de l'industrie du vent (= tendance à vouloir dépeindre les personnes se plaignant des nuisances dues aux éoliennes comme des hypersensibles, à la limite de l'hystérie ou de l'affabulation) plutôt qu'une hypothèse scientifique valide.

8. Perspectives d'études

Les pages qui précèdent ont montré que les problèmes liés aux éoliennes dépassent largement les atteintes aux paysages et que l'impact sur les humains est aussi de nature physiologique et psychologique. Toutefois, les assertions avancées par les chercheurs souffrent parfois d'un manque de cas permettant de consolider leurs théories par des tests statistiques et de leur donner ainsi une crédibilité supplémentaire.

Des études complémentaires sont donc nécessaires dans plusieurs cas. Ceci est d'ailleurs demandé par les chercheurs eux-mêmes qui jusqu'à présent ont souvent travaillé sans aide financière de leurs gouvernements, d'où parfois leurs difficultés à être pris au sérieux, par manque de temps et de moyens.

Il est absolument primordial que les recherches encore nécessaires, dans le domaine médical (physiologie et épidémiologie) ou scientifiques (acoustique), pour mieux définir les risques encourus par les riverains d'éoliennes industrielles, soient menées par des chercheurs dont l'indépendance est avérée. C'est la seule façon de progresser, au vu des enjeux (humains et financiers) en présence et des conflits d'intérêts de toutes les parties impliquées.

8.1. Impact visuel

Pedersen et al. (2004) concluent leur article en disant : « Il faudrait des études supplémentaires pour analyser l'impact visuel des éoliennes (faire des comparaisons entre terrain plat et terrain où les éoliennes sont moins visibles) ainsi que des études sur l'influence des paramètres individuels et contextuels ».

8.2. Nuisances sonores et distance aux habitations

Des études de nuisances supplémentaires devraient être financées afin de préciser les normes de distance aux habitations. Elles devraient prendre en compte la topographie, la nature du sol, le type d'organisation démographique (environnement rural ou (semi) urbain) et les périodes d'exposition (jour/nuit). Elles devraient utiliser des systèmes de mesures tenant compte non seulement des sons de hautes fréquences mais également des sons de basses fréquences et des infrasons.

8.3. Impact sur l'humain et l'animal

Colby et al. doutent de l'existence du syndrome éolien décrit par Pierpont, « du fait qu'il n'est pas suffisamment documenté et qu'aucun groupe témoin valide n'est utilisé ». Par conséquent, il serait souhaitable que des études complémentaires avec groupe témoin soient subventionnées et menées afin d'attester de la fiabilité de ces résultats. Ceci est d'ailleurs relevé par Pierpont elle-même.

La physiopathologie du syndrome éolien mériterait d'être approfondie. Dans ce sens, les observations effectuées sur le terrain dans le monde entier par des médecins généralistes, dans le cadre de leur pratique quotidienne, mériteraient d'être collectées et analysées systématiquement.

Des études de longue haleine sur les impacts des éoliennes sur la faune sauvage ont été menées par des biologistes européens et nord-américains. Elles ont montré que les effets destructeurs sur certains habitats et leurs occupants sont indéniables (Orloff et al. 1992, Leddy et al. 1999, Keeley et al. 2001, Rabin et al. 2006, Devereux et al. 2008, etc.).

En complément aux études effectuées sur les oiseaux et les chauve-souris, des études portant sur l'impact des éoliennes sur les animaux domestiques devraient être menées. En effet, il est connu d'une manière générale (Buxton 2006), que le bruit peut avoir des effets sur la ponte, la production de lait, les blessures, la sécrétion hormonale, la rétention d'eau, l'activité cardiaque, les problèmes respiratoires et l'appétit chez les animaux de rente. Autant de domaines qui ont des répercussions sur le rendement, sans oublier non plus le bien-être des animaux.

8.4. Sons de basses fréquences et infrasons

Sachant que les éoliennes produisent réellement des sons de basses fréquences et des infrasons, la nécessité de mener des analyses de bruits en tenant compte de ces données est indéniable.

Des études épidémiologiques doivent être menées sur le terrain, de manière à cibler l'influence des sons de basse fréquence et des infrasons, à des doses prolongées et répétitives, sur les riverains et de définir, le cas échéant, les limites acceptables de puissance et de durée d'exposition.

En réponse à ses détracteurs qui prétendent que « ce qui ne peut pas être entendu ne peut pas nuire », Salt a d'ailleurs demandé dans sa présentation intitulée « Responses of the inner ear to infrasound », lors du dernier congrès sur le sujet à Rome en avril 2011, que des études complémentaires soient menées de manière officielle. Selon lui, « la complexité de la réponse de l'oreille aux infrasons conduit à la conclusion qu'il y a plusieurs aspects qui nécessitent d'être mieux compris avant que la possible influence des infrasons puisse être considérée comme insignifiante ».

D'une manière générale, des recherches plus approfondies devraient encore être menées pour pouvoir conclure que ce type de stimulation cause des symptômes spécifiques chez les gens ou peut influencer la physiologie de l'oreille.

Ceci est aussi relevé par Villey-Migraine qui précise qu'« il manque des études épidémiologiques chez l'homme effectuées sur de longues périodes d'exposition (plusieurs années), comme on le vit dans notre environnement réel, à des doses infrasoniques prolongées et répétitives ». Ainsi, on n'a pas défini pour l'instant de limite acceptable de puissance et de durée pour l'exposition humaine aux infrasons.

9. Recommandations

Les troubles liés aux éoliennes sont avérés et peuvent gâcher la vie des gens. Ils ont été constatés ailleurs qu'en Suisse, dans des pays voisins qui ont plus de recul que nous, tels que l'Allemagne, la Suède, le Danemark, la Grande Bretagne, les Pays-Bas, sans parler des cas relevés aux Etats-Unis et en Australie.

Si certaines nuisances semblent plus réelles que d'autres à ce stade, il ne faut pas oublier que les plaintes des gens précèdent souvent les études scientifiques qui démontreront par la suite leur véracité⁴.

Des organisations telles que l'OMS, des instances gouvernementales comme l'Académie française de médecine et même l'Association Britannique de l'Energie Eolienne ont commandité des études épidémiologiques qui doivent être menées à long terme sur les riverains des éoliennes. Les résultats de ces études ne sont pas encore connus. Le délai est souvent très long entre les premiers doutes sur une nuisance quelconque, les observations cliniques et enfin la diffusion de la vérité scientifique au public.

En attendant, les recommandations ci-dessous devraient être prises en considération par les décideurs, les inciter à la plus grande circonspection et à une écoute attentive des riverains.

9.1. Recommandations de l'OMS

Le bureau régional de l'OMS pour l'Europe a lancé en 2003 une étude destinée à examiner les effets des bruits nocturnes sur les perturbations du sommeil et la santé en général. Le but de cette étude est de produire des recommandations sur les niveaux admissibles de bruits nocturnes. Un rapport préliminaire a été publié en 2009 (WHO 2009). En voici les principales conclusions :

- Le sommeil est une nécessité biologique et un sommeil perturbé est lié à un certain nombre d'atteintes négatives à la santé.

⁴ Plusieurs exemples célèbres allant dans ce sens peuvent être mentionnés, comme les effets de l'amiante sur le système respiratoire, ceux du mercure sur le système nerveux, ceux du distilbène sur le système génital féminin, ceux des phtalates sur la physiologie de la reproduction, etc. La liste est longue.

- Les preuves d'effets biologiques du bruit durant le sommeil sont nombreuses : augmentation du rythme cardiaque, changements de phases de sommeil, modifications du taux de certaines hormones, réveils.
- Les preuves sont nombreuses que l'exposition nocturne au bruit cause des perturbations du sommeil, augmente la consommation de médicaments, détermine une agitation durant le sommeil (mouvements) et de l'insomnie.
- Alors que les perturbations du sommeil dues au bruit sont considérées comme un problème de santé en soi, elles conduisent également à des problèmes ultérieurs de santé et de bien être.
- Il existe un certain nombre de preuves qu'un sommeil perturbé peut conduire à de la fatigue, des accidents et des performances réduites.
- Il existe de même un certain nombre de preuves que le bruit nocturne cause des problèmes tels que maladies cardiovasculaires, dépression et autres maladies mentales.

Le rapport préliminaire recommande par conséquent que pour prévenir les effets du bruit nocturne sur la santé, les populations ne doivent pas être exposées durant la nuit à des niveaux de bruits dépassant les 30-40 dB à l'extérieur des habitations. Il faut préciser que l'étude se concentre sur le trafic routier et aérien. Or il a été démontré que le bruit des éoliennes est plus agaçant que celui du trafic.

9.2. Respect des riverains

Il est important que les autorités et les développeurs acceptent de voir ce qui se passe réellement pour les populations riveraines d'éoliennes industrielles. Les plaintes ne sont pas le fait de personnes hystériques ou présentant des désordres physiques ou psychiques préalables. Les mêmes mots sont utilisés partout dans le monde pour décrire les mêmes maux.

L'impact sur les gens commence par être physique (principalement problèmes dus aux perturbations du sommeil) mais les impacts psychiques sont également non négligeables. Ces impacts se retrouvent chez les riverains déjà exposés, mais aussi, ce qui est encore plus préoccupant, chez des populations simplement mises devant des projets de développements.

Dans certains cas, une véritable division sociale voit le jour entre les pro- et les anti-éoliens, sous la pression de l'industrie du vent et de ses techniques de marketing agressives. Des villages se déchirent, des familles et des groupes d'amis se séparent. Ceci est spécialement évident dans les communautés rurales.

Un projet d'implantation d'éoliennes industrielles mal conduit et mal accepté risque de déboucher non seulement sur un problème de santé publique mais aussi plus largement sur un problème de société.

9.3. Recommandations concernant les normes d'implantation

Il existe en Suisse un certain nombre de normes concernant les éoliennes et les projets d'implantation. Sur la chaîne jurassienne, l'installation des premières éoliennes industrielles remonte aux années 1995-96. Depuis, la situation a beaucoup changé. Les nouvelles générations d'éoliennes n'ont plus grand-chose à voir avec celles de l'époque. Les normes par contre n'ont pas évolué et elles ne sont plus du tout adaptées.

Ceci est particulièrement vrai pour ce qui est des distances minimales à respecter entre une éolienne et les habitations les plus proches.

9.3.1. Distances d'implantation

De nombreux auteurs se sont penchés sur ces problèmes de distances entre éoliennes industrielles et habitations:

Rogers et al. (2002/2006) préconisent que si une éolienne est prévue à une distance plus petite que celle équivalant à 3x sa hauteur (sommet de la pale), une étude de bruit devrait être réalisée et publiée.

Kamperman (acousticien britannique renommé) et al. (2008 a et b) soulignent que plus les éoliennes sont grandes, plus il est nécessaire d'augmenter les distances d'éloignement, surtout si l'on se trouve en milieu rural où le calme est plus grand. Dans leur article, ils recommandent par conséquent une distance minimale de 1 km.

Pierpont (2009) recommande une distance de 2 km entre éoliennes et habitations en terrain plat et de 3 km au moins dans les montagnes.

En Australie, le Dr Laurie recommande une distance pouvant aller jusqu'à 10 km, principalement à cause des infrasons et de leur distance de propagation, et ce jusqu'à ce que les recherches adéquates aient été accomplies.

Moins radical, un comité du Parlement de New South Gales a recommandé en 2009 une distance minimale de 2 km.

Au Canada, le Ministère de l'environnement de l'Ontario a publié un papier de recommandations selon lequel il faut limiter à 40 dB le niveau de bruit d'une éolienne à 30 mètres des habitations. Quant à la distance minimale d'implantation, elle varie de 550 m à 1.5 km selon le type et le nombre d'éoliennes.

En Suisse, Pro Crêtes demande une distance minimum de 1 km, idéalement 1.5 km.

On remarquera qu'un certain consensus semble se dessiner autour d'une distance minimale de 1.5 à 2 km. Il est toutefois nécessaire de prendre également en compte que chaque situation environnementale est particulière. Pedersen et al. (2007) recommandent ainsi de considérer lors de chaque nouveau projet d'implantation l'influence de tous les facteurs relatifs à la région (zones rurales vs zones semi-urbaines, terrain plat vs terrain accidenté, nature du sol, couverture végétale, etc.). Ceci afin d'éviter des effets sur la santé.

(A noter que Suisse-Eole a refusé jusqu'à présent d'entrer en matière sur une quelconque réglementation de la distance minimale ainsi que sur des corrections de niveaux sonores recommandés par l'EMPA (2010). Ceci montre à quel point le lobby éolien est puissant dans notre pays.)

9.3.2. Zones d'implantation

Les éoliennes sont des installations industrielles et non des machines agricoles. De ce fait, leur place n'est pas en zones agricoles mais en zones industrielles. Elles ne doivent pas non plus être installées en zones de détente.

9.3.3. Nuisances sonores : un problème minimisé

Actuellement en Suisse, les nuisances sonores liées au fonctionnement des éoliennes sont minimisées, pour ne pas dire négligées. Leur impact sur les populations ne fait actuellement l'objet d'aucune réglementation spécifique.

Il est primordial d'adapter les normes aux technologies modernes mais aussi aux nouvelles connaissances quant aux impacts des éoliennes sur les riverains.

La gêne due aux sons de basses fréquences doit être prise en considération comme étant un réel problème. Il est nécessaire de mettre sur pied de nouvelles méthodes d'évaluation, en tenant compte de la sensibilité des populations à ce type de sons.

Pour ce qui est des infrasons, il faudrait les étudier plus avant en tant que cause possible de symptômes, au lieu de les écarter comme une cause improbable.

9.4. Ecouter et donner la parole aux riverains

Lors d'un projet d'implantation d'éoliennes, il ne suffit pas de modéliser ce que pourraient être les impacts sur les riverains, ni de se contenter de respecter les normes. Il faut absolument associer la population locale à la réflexion, lui donner la possibilité d'exprimer ses craintes et ses envies. Les riverains potentiels doivent pouvoir discuter le choix des emplacements avec les autorités et les développeurs. Le fait de se sentir partie prenante peut aider par la suite à mieux supporter d'éventuelles nuisances.

Lorsque les parcs éoliens sont déjà réalisés et face à des plaintes répétées, les autorités et les développeurs devraient au minimum rencontrer les plaignants et définir avec eux un terrain d'entente. Des solutions ont pu être trouvées à certains endroits. Elles vont du simple arrêt des turbines durant la nuit (dans les situations peu préoccupantes) au démantèlement complet d'une ou plusieurs éoliennes dans les cas de très grandes nuisances.

9.5. Recommandation finale

Le principe de précaution a été défini pour la Suisse en 2003 dans un document élaboré par un groupe de travail interdépartemental⁵. Ce texte stipule notamment :

1. Le principe de précaution est applicable lorsque les certitudes scientifiques manquent ou sont insuffisantes pour prouver la relation de cause à effet et que, simultanément, de sérieux indices font craindre un risque important pour la santé de l'homme et des animaux ou pour l'environnement.

2. En cas d'incertitude scientifique, il y a un droit, voire une obligation, de prendre des mesures préventives. L'application du principe doit obéir à des processus transparents et conformes à l'Etat de droit.

⁵ Le principe de précaution en Suisse et au plan international. Document de synthèse du groupe de travail interdépartemental « Principe de précaution », août 2003. Autorités représentées : Office fédéral de la santé publique (OFSP), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Office vétérinaire fédéral (OVF), Secrétariat suisse à l'économie (SECO), Département fédéral des affaires étrangères (DFAE).

3. Il convient de mener des recherches plus poussées, notamment en vue de trouver des solutions de rechange, dans le but d'éliminer l'incertitude scientifique.

D'aucuns sont d'avis qu'il appartient au « pollueur » de prouver la sécurité de son activité éventuellement dangereuse et non pas aux victimes potentielles (renversement de la charge de la preuve).

4. L'analyse des risques repose sur les principes de la scientificité et de la transparence. Une évaluation exhaustive des risques comporte une détermination de la cause du danger, l'appréciation de la menace pour l'homme, les animaux et l'environnement, selon des principes scientifiques ainsi que des stratégies et des propositions d'action pour réduire ces risques. Les résultats et les mesures qui en sont dérivées sont communiqués de façon compréhensible et transparente aux personnes concernées et, selon les cas, au grand public.

5. Si la gestion des risques se voit confrontée à des incertitudes scientifiques, le principe de précaution peut être appliqué afin qu'il soit possible d'adopter les mesures nécessaires pour assurer le niveau de protection socialement admis. En conséquence, le principe de précaution est un instrument de gestion des risques, permettant de les maîtriser en tenant compte de leur évaluation.

En coopération avec les milieux intéressés, les mesures nécessaires sont prises et mises en œuvre, en tenant compte des aspects scientifiques et d'autres facteurs légitimes. Les mesures doivent permettre de réduire le risque à un niveau tolérable pour tous ceux qui y sont exposés (qui risquent de subir les conséquences d'un incident indésirable). Les répercussions des mesures prises sont surveillées. Si les connaissances se modifient, les stratégies visant à diminuer le risque ou, le cas échéant, l'analyse du risque elle-même, doivent être révisées.

6. Communication des risques : Dans le contexte actuel de mondialisation des marchés et de diffusion instantanée des informations par les médias et Internet, la perception des risques par tout un chacun est devenue la règle. En impliquant sans tarder les milieux touchés et intéressés dans le processus d'analyse des risques, il est possible d'identifier rapidement les diverses préoccupations et craintes et d'y répondre de manière adéquate. Il faut viser en principe un maximum de transparence. Par ailleurs, les craintes et préoccupations de la population doivent être prises au sérieux autant que les risques scientifiquement reconnus. La confiance des milieux concernés dans les décisions prises par les autorités s'en trouve renforcée et les mesures à prendre seront mieux acceptées. Si la communication des risques fait défaut ou est insuffisante, il se peut que le public perçoive le risque potentiel comme nettement plus grand qu'il ne l'est en réalité. Cet outil constitue par conséquent un élément essentiel d'une bonne analyse des risques.

En conséquence de ce qui précède et afin d'éviter de multiplier les expériences malheureuses, aucune nouvelle implantation d'éolienne industrielle ne devrait être autorisée à proximité de zones habitées, tant que les résultats des études complémentaires nécessaires ne seront pas connus.

10. Conclusion

Jusqu'à présent, pour la plupart des promoteurs de parcs éoliens et pour les décideurs politiques, la gêne ressentie par les riverains d'éoliennes, de même que les symptômes qu'ils mettent en avant ont principalement une origine subjective ou sont dus à une perception individuelle négative des turbines dans le paysage.

Cette vision des choses témoigne au mieux d'une méconnaissance des phénomènes complexes liés au bruit et à sa perception par les humains et au pire d'un désintérêt manifeste.

Il est légitimement très difficile pour les personnes souffrant de la proximité d'éoliennes industrielles de voir leurs plaintes minimisées ou ignorées, à la fois par les développeurs et les autorités. Sans parler des services de la santé publique qui ne se manifestent pas et ne se sentent pas concernés, alors même que leur rôle est de garantir la sécurité sanitaire des populations.

Les conséquences directes de ce manque d'écoute sont le désespoir, la colère et une augmentation des problèmes ressentis.

Dans le même sens, les craintes non prises en compte des populations confrontées à des projets de développement futurs débouchent sur un état d'esprit proche de la révolte.

Le présent dossier a permis de mettre en évidence, sur la base des travaux de nombreux auteurs, que les contrariétés dues aux éoliennes sont bien réelles, qu'elles ont des effets néfastes avérés sur la santé et que ces effets ne sont pas seulement auditifs.

Il serait souhaitable qu'il contribue à donner plus d'écoute aux riverains concernés et qu'il convainque les autorités concernées de l'urgence de mettre en route des études complémentaires.

Bien que la durée de vie d'un parc éolien ne soit estimée qu'à une vingtaine d'années, ce qui est court en termes d'infrastructures, c'est aussi l'espace de vie d'une génération, ce qui à l'échelle humaine et en présence de nuisances importantes n'est pas négligeable.

Face à l'ampleur prise par les voix qui dénoncent les nuisances dues aux éoliennes partout dans le monde, il semble que la situation doit être réévaluée dans chaque pays, en mettant l'accent sur le point de vue humain plutôt qu'économique et en ayant le courage (ou la sagesse) d'éventuellement changer de cap.

Pour ce qui est de la situation en Suisse, principalement dans l'Arc jurassien et plus spécialement dans les Franches-Montagnes où l'habitat est très dispersé, il y a une réelle nécessité à revoir la stratégie. La configuration du cadre bâti rend très difficile l'implantation d'éoliennes géantes à une distance suffisante des habitations. En effet, selon la législation sur le bruit, même une ferme isolée a droit à la protection contre les nuisances du bruit.

Dans ce sens, il sera certainement nécessaire de revoir certains projets d'implantation en admettant que les chaînes jurassiennes ne sont pas forcément propices à l'implantation de turbines à vent industrielles. Il faudra alors privilégier les installations privées, de taille plus compatibles avec la configuration des lieux et envisager de concentrer les efforts de développement vers d'autres sources d'énergies renouvelables.

11. Bibliographie

Académie nationale française de médecine. 2005. Le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'homme. Rapport, annexes, recommandations. 17 pp.

www.Academiemedecine.fr/sites_thematiques/EOLIENNES/chouard_rapp_14mars_2006.htm.

Bakker H. et al. 2009. Seismic Effect on Residents from 3 MW Wind Turbines. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, Denmark, 17-19 June 2009.

Balaban C.D. et al. 2001. Neurological bases for balance-anxiety links. *J. Anxiety Disord.* 15 : 53-79.

Balaban C.D. 2002. Neural substrates linking balance control and anxiety. *Physiol. Behav.* 77 : 469-475.

Berglund B. et al. 1996. Sources and effects of low frequency noise. *JASA J. Acoust. Soc. Am.* 99(5) : 2985-3002.

Brandt T. et al. 2005. Vestibular loss causes hippocampal atrophy and impaired spatial memory in humans. *Brain* 128 : 2732-2741.

Brüel V. et al. 1973. Mesures infrasonores. Technical Review Brüel & Kjaer 3 :14-26.

Buxton I. 2006. Low Frequency Noise and Infrasound (Some possible causes and effects upon land-based animals and freshwater creatures). A literary comment. 71 pp.

Clark C. et al. 2005. Exposure effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension : the RANCH project. *Am. J. Epidemiol.* 163 : 27-35.

Colby et al. 2010. Wind Turbine Sound and Health Effects ; An Expert Panel Review. American and Canadian Wind Energy Associations.

Concept d'énergie éolienne pour la Suisse. 2004. Bases pour la localisation de parcs éoliens. 34 pp. Office fédéral de l'énergie OFEN, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP, Office fédéral du développement territorial ARE.

Devereux C.L. et al. 2008. Minimal effects of wind turbines on the distribution of wintering farmland birds. *J. Applied Ecology* 45 : 1689–1694.

Dieterich M. et al. 2008. Functional brain imaging of peripheral and central vestibular disorders. *Brain* 131(10) : 2538-2552.

Edge P.M. et al. 1966. Description of Langley low frequency noise facility and study of human response to noise frequencies below 50 cps. NASA Technical Note D-3204, 11pp.

EMPA. 2010. Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen. 40 pp.

Evans G.W. 2006. Child development and the physical environment. *Annu. Rev. Psychol.* 57 : 423-451.

Evans G.W. et al. 1997. Chronic noise exposure and reading deficits : the mediating effects of language acquisition. *Environ. Behav.* 29(5) : 638-656.

Feldmann J. et al. 2004. Effects of low frequency noise on man : a case study. *Noise Health* 7(25) : 23-28.

Findeis H. et al. 2004. Disturbing effects of low frequency sound immissions and vibrations in residential buildings. *Noise Health* 6(23) : 29-35.

Fraiman B.J. et al. 1993. The experimental investigations of low frequency noises in the everyday life. *Internoise 1993*, 1157-1160.

Frey B.J. et al. 2007. Noise radiation from wind turbines installed near homes : effects on health. www.windnoisehealthhumanrights.com

Furman J.M. et al. 2001. Interface between vestibular dysfunction and anxiety : more than just psychogenicity. *Otol. Neurotol.* 22(3) : 426-427.

Gavreau V. et al. 1966. Infrasons : générateurs, détecteurs, propriétés physiques, effets biologiques. *Acoustica* 17(1) : 1-10.

Haines M.M. et al. 2001. A follow-up study of effects of chronic aircraft noise exposure on child stress responses and cognition. *Int. J. Epidemiol.* 30 : 839-845.

Halberstadt A. et al. 2003. Organization of projections from the raphe nuclei to the vestibular nuclei in rats. *Neuroscience* 120(2) : 573-594.

Hanes D.A. et al. 2006. Cognitive-vestibular interactions : a review of patient difficulties and possible mechanisms. *J. Vest. Res.* 16(3) : 75-91.

Hanning C. 2009. Sleep disturbance and wind turbine noise. 33 pp. SSWFAG

Hanning C. 2010. Wind turbine noise, sleep and health. 60 pp. Society for Wind Vigilance.

Hanning C. et al. 2011. Selection of outcome measures in assessing sleep disturbance from wind turbine noise. Contribution Wind Turbine Noise Conference, Rome, April 2011.

Harris C. 1991. Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control. McGraw-Hill, Inc., New York.

Harry A. 2007. Wind turbines, noise and health. www.windturbinenoisehealthhumanrights.com.

Hubbard H.H. et al. 1991. Aeroacoustics of large wind turbines. *J. Acoust. Soc. Am.* 89(6) : 2495-2508.

Jung S.S. et al. 2008. Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise. *J. Korean Physic Soc.* 53:1897-1905.

Kabes D.E. et al. 2001. Lincoln Township Wind Turbine Survey, Agricultural Resource Center, University of Wisconsin Extension / Cooperative Extension.

Kamperman G.W. et al. 2008 a. Simple guidelines for siting wind turbines to prevent health risks. Noise-Con 2008. Dearborn, Michigan, USA.

Kamperman G.W. et al. 2008 b. The « How to » guide to siting wind turbines to prevent health risks from sound. www.windturbinesyndrome.com/wp-content/uploads/2008/11/kamperman-james-10-28-08.pdf

Keeley B. et al. 2001. Bat ecology and wind turbine considerations. Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting, 4:135-146. National Wind Coordinating Committee, Washington DC, USA.

Landstorm U. et al. 1984. Infrasonic threshold levels of physiological effects. *J. of Low Noise Vib.* 3(4) : 167-173.

Laurie S. et al. 2011. Wind turbine noise and morning blood pressure. Contribution Wind Turbine Noise Conference, Rome, April 2011.

Le Pichon A. 2004. Contribution d'un modèle 3D de tracé de rayons dans un milieu complexe pour la localisation de sources infrasonores. Thèse de doctorat en géophysique. CEA.

Leddy K.L. et al. 1999. Effects of wind turbines on upland nesting birds in conservation reserve program grasslands. *Wilson Bull.* 11(1) : 100-104.

Legerton M.L. et al. 1996. Low frequency noise & vibration levels at modern wind farms. *Internoise 1996*, 460-462.

Lercher P. et al. 2003. Ambient noise and cognitive processes among primary schoolchildren. *Environ. Behav.* 35(6) : 725-735.

Leventhall H.G. 2004. Low frequency noise and annoyance. *Noise Health* 6 :59-72.

Mittelstaedt H. 1996. Somatic graviception. *Biol. Psychol.* 42(1-2) : 53-74.

Mittelstaedt H. 1999. The role of the otoliths in perception of the vertical and in path integration. *Ann. NY Acad. Sci.* 871: 334-344.

Møller H. et al. 1984. Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies. *J. of Low frequency Noise, Vibration and Active Control.* 3 (2). 78-87.

Møller H. et al. 2002. A questionnaire survey of complaints of infrasound and low frequency noise. *J. of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control.* 21 : 53-65.

Nissenbaum M. 2010. Mars Hill study, preliminary results.
www.windvigilance.com/mars_hill.aspx.

Nissenbaum M. et al. 2011. Adverse health effects of industrial wind turbines. Contribution Wind Turbine Noise Conference, Rome, April 2011.

OFEV 2010. Rapport d'état bruit et vibrations.
www.bafu.admin.ch/umwelt/status/03989/index.html?lang=fr

Okada A. et al. 1990. Comparative study of the effects and low frequency sounds with those of audible sounds on sleep. *Environ. Int.* 16 : 483-490.

Orloff S. et al. 1992. Wind Turbine Effects on Avian Activity, Habitat Use, and Mortality in Altamont Pass and Solano County Wind Resource Areas. Work performed by BioSystems Analysis, Inc., Tiburon, CA. Sacramento, CA: California Energy Commission.

Pedersen E. et al. 2003. Perception and annoyance of wind turbine noise in a flat landscape. *Internoise 2002.*

Pedersen E. et al. 2004. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship. *J. Acoust. Soc. Am.* 116(6) : 3460-70.

Pedersen E. et al. 2007. Response to wind turbine noise in different living environments. *Occup. Environ. Med.* 64 : 480-486.

Pedersen E. et al. 2008. Wind turbines – low level noise sources interfering with restoration ? *Environmental Research Letters.* 3 : 1-5.

Pedersen E. 2009 a. Effects on wind turbine noise on humans. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, Denmark, 17-19 June 2009.

Pedersen E. et al. 2009 b. Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *J. Acoustic. Soc. Am.* 126 : 634-643.

Persson W.K. 2004. Effects of low frequency noise on sleep. *Noise Health* 6(23) : 87-91.

Persson W. K. et al. 2000. Experimental quantification of annoyance to unpleasant and pleasant wind turbine sounds. *Internoise 2000,* 3994-3997.

Pierpont N. 2009. Wind Turbine Syndrome : A report on a Natural Experiment. 294 pp. K-Selected Books. Santa Fe, New Mexico, USA.

Principe de précaution. 2003. Le principe de précaution en Suisse et au plan international. Document de synthèse du groupe de travail interdépartemental « Principe de précaution », août 2003. 31 pp. Autorités représentées : Office fédéral de la santé publique (OFSP), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Office vétérinaire fédéral (OVF), Secrétariat suisse à l'économie (SECO), Département fédéral des affaires étrangères (DFAE).

Qibai C.Y. et al. 2004. An Investigation on the Physiological and Psychological Effects of Infrasound on Persons. *J. of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control.* 23(1) : 71-76.

Rabin L.A. et al. 2006. The effects of wind turbines on antipredator behavior in California ground squirrels (*Spermophilus beecheyi*). *Biological Conservation* 131 : 410-420.

Renard C. 2005. Les infrasons, nuisances rédhibitoires des éoliennes. 9 pp.

Roch P. 2011. Eoliennes, des moulins à vent ? Un chemin entre refus et démesure. Ed. Favre, Lausanne, 165 pp.

Rogers A. L. et al. 2002 (amended 2004). Wind Turbine Noise Issues. 19 pp. Renewable Energy research Laboratory. Univ. Massachusetts, Amherst, USA.

Rogers A.L. et al. 2002 (amended 2006). Wind Turbine Acoustic Noise. 26 pp. Renewable Energy Research Laboratory. Univ. Massachusetts, Amherst, USA.

Sadock B. J. et al. 2005. Kaplan & Sadock's Comprehensive Textbook of Psychiatry. PA : Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia.

Salt A.N. 2004. Acute endolymphatic hydrops generated by exposure of the ear to nontraumatic low frequency tones. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 5(2) : 203-214.

Salt A.N. 2010. Infrasound : Your ears hear it but they don't tell your brain. First Symposium on Adverse Effects of Industrial Wind Turbines, Picton, Ontario, Canada.

Salt A.N. et al. 2010. Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound an wind turbines. *Hearing Research* 268 : 12-21.

Salt A.N. 2011. Responses of the inner ear to infrasound. Contribution Wind Turbine Noise Conference, Rome, April 2011.

Stelling K. et al. 2010. Summary of recent research on adverse health effects of wind turbines. 39 pp.

Styles P. et al. 2005. Microseismic and infrasound monitoring of low frequency noise and vibrations from windfarms : recommendations on the siting of windfarms in the vicinity of Eskdalemuir, Scotland. 125 pp. Keele University (UK). Report for the Ministry of Defense.

Sugimoto T. et al. 2008. Measurement of infrasound generated by wind turbine generator. Proc.SICE Conf. 5-8.

Takigawa H. et al. 1991. Effects of infrasound on vestibular function. J. of Sound and Vibration 151(3) : 455-460.

Todd N. et al. 2008. Tuning and sensitivity of the human vestibular system to low frequency vibration. Neuroscience Letters. 444 : 36-41.

Van den Berg G.P. 2004. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. J. of Sound and Vibration. 277 : 955-970.

Van den Berg G.P. 2005. The beat is getting stronger : the effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. J. of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 24 (1) : 1-24.

Van den Berg G.P. 2006. The sound of high winds : the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral Thesis, Rijksuniversiteit Gröningen, The Netherlands.

Van den Berg G.P. et al. 2008. WINDFARMperception. Visual and acoustic impact of wind turbines farms on residents. FP6-2005-Science-and-Society-20. Specific Support Action Project n° 044628.

Vasudevan R.N. et al. 1977. Experimental study of annoyance due to low frequency environmental noise. Applied Acoustics 10 : 57-69.

Villey-Migraine M. 2004. Eoliennes, sons et infrasons: effets de l'éolien industriel sur la santé des hommes. Rapport, 14 pp.

Von Gierke H.E. et al. 1994. Differences in otolith and abdominal viscera graviceptor dynamics : implications for motion sickness and perceived body position. Aviat. Space Environ. Med. 65(8) : 747-751.

World Health Organisation. 1999. Guidelines for Community Noise. Copenhagen.

World Health Organisation. 2009. Night noise guidelines for Europe. Copenhagen.

Yates B.J. et al. 1999. Cardiovascular responses elicited by linear acceleration in humans. Exp. Brain Res. 125 : 476-484.