

Défis de l'utilisation réglementaire de l'émergence sonore¹

Guillaume Dutilleux 1,* , Truls Gjestland 2 et Gaetano Licitra 3,4

1. Acoustics Research Center, Département des systèmes électroniques, NTNU, 1,7491 Trondheim, Norvège
2. Acoustics Research Center, SINTEF Digital, N-7465 Trondheim, Norvège ; truls.gjestland@sintef.no
3. Département de physique, Université de Pise, Largo Pontecorvo 3, 56127 Pise (PI), Italie ; G.licitra@arp.toscana.it
4. Agence de protection de l'environnement de la région Toscane, Via Vittorio Veneto 27, 56127 Pise (Pi), Italie

* Correspondance : guillaume.dutilleux@ntnu.no

Résumé : Dans la grande majorité de la législation sur le bruit dans l'environnement, la métrique utilisée pour exprimer les valeurs limites est basée sur le niveau de pression acoustique. Mais certains pays ont introduit des valeurs limites d'émergence sonore où la conformité d'une activité bruyante est définie comme la différence maximale admissible entre le niveau de pression acoustique avec et sans la contribution sonore de l'activité réglementée. Cet article étudie les fondements et les mérites de ce type de valeurs limites différentielles de bruit. Notre revue de la littérature indique qu'il y a très peu de preuves en faveur de l'utilisation de limites de bruit différentielles par rapport aux limites « absolues ». De plus, alors que les limites d'émergence sonore semblent provenir d'une réflexion sur l'audibilité de la source de bruit réglementée, celles-ci semblent donner peu d'indications sur ce qui est audible et ce qui ne l'est pas. En outre, la définition et la mesure concrète de l'émergence sonore posent plusieurs problèmes qui compromettent la reproductibilité des résultats. De surcroît, la référence au bruit de fond rend très difficile, premièrement, de vérifier la conformité des installations bruyantes sur le long terme, deuxièmement, de protéger efficacement les riverains d'un bruit excessif et, troisièmement, d'évaluer la conformité sur la base de simulations. Lorsqu'il n'est pas envisageable de passer à une autre métrique, cet article formule des recommandations pour une utilisation plus fiable de l'émergence sonore.

Abstract: In the vast majority of legislation on environmental noise, the metric used for expressing limit values is based on sound pressure levels. But some countries have introduced sound emergence limit values where the compliance of a noise-generating activity is defined as a maximum allowable difference between the sound pressure level with and without the regulated activity operating. This paper investigates the foundations and the merits of this kind of differential noise limit values. Our review of literature indicates that there is very little evidence supporting the use of differential noise limits over absolute ones. Moreover, while sound emergence limits seem to originate from consideration about audibility of the regulated

¹ Cet article est une traduction amendée de Dutilleux, G., Gjestland, T., and Licitra, G. (2019). *Challenges of the use of sound emergence for setting legal noise limits*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(4517):14.

noise source, they appear to give little insight into what is audible and what is not. Furthermore, both the definition and the practical measurement of sound emergence raise several challenges that compromise reproducibility. In addition, first, the reference to background noise makes it very difficult first to ascertain the conformity of noisy installations in the long run, second to effectively protect the community from excessive noise and third to evaluate conformity on the basis of simulations. When switching to another metric is not an option the paper makes recommendations toward a more reliable use of sound emergence.

1. Introduction

Un grand nombre de pays dans le monde ont élaboré des réglementations contre le bruit dans l'environnement, y compris le bruit des transports, le bruit industriel et les bruits de voisinage [1,2]. La plupart de ces pays ont choisi de s'appuyer sur des valeurs limites exprimées en niveaux de pression acoustique "absolus". D'autres préfèrent toutefois exprimer les valeurs limites par rapport au niveau de bruit de fond, du moins en ce qui concerne le bruit de voisinage ou le bruit industriel. La mise en relation du bruit total ou du bruit attribuable à la source avec le bruit de fond conduit aux concepts d'émergence sonore ou, plus largement, à ce que l'on peut appeler des indicateurs différentiels de bruit. L'émergence sonore est en effet un membre de la classe des indicateurs différentiels de bruit. A l'époque où les législations contre le bruit ont été développées, il y avait peu d'arguments pour justifier un type de métrique par rapport à un autre. L'émergence sonore était clairement une option possible, tout comme le niveau de pression acoustique continu équivalent, le niveau maximal basé sur le niveau de pression acoustique pondéré temporellement ou l'exposition sonore. À première vue, l'émergence sonore peut sembler tout à fait pertinente dans l'optique de limiter les altérations des paysages sonores existants. Mais en pratique, la mise en œuvre de l'émergence sonore s'avère délicate.

L'objectif de cet article est de discuter plus en détail du concept d'émergence sonore tel qu'il est défini par la normalisation internationale, d'évaluer sa pertinence sous différents angles et de montrer que l'émergence sonore pose plusieurs problèmes aux exploitants d'installations bruyantes, aux riverains, aux acousticiens et aux autorités, sans apporter aucun avantage par rapport aux valeurs limites basées sur le niveau de pression acoustique dans la plupart des cas. Seule une législation élaborée peut aider à surmonter certains des écueils de l'évaluation de l'émergence sonore.

Ce document est organisé comme suit. La section 2 fournit les définitions nécessaires de l'émergence sonore et de ses composantes. La section 3 examine la présence du concept d'émergence sonore dans la législation d'un grand nombre de pays développés, et fait la distinction avec des indicateurs connexes mais clairement différents. La section 4 évalue la pertinence de l'émergence sonore en ce qui concerne la perception humaine et la gêne. La section 5 traite des défis sous-jacents de l'émergence sonore lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre cette métrique dans les normes de mesure. La section 6 traite de la complexité de l'utilisation de l'émergence sonore dans le développement d'infrastructures et d'activités. La section 7 présente quelques recommandations.

2. Définitions

L'émergence sonore est présente dans la norme ISO 1996 depuis la première version de la norme [3]. Elle est définie comme suit dans la version actuelle de l'ISO 1996-1 [4] :

Définition 1. émergence sonore [[4], §3.4.7]

augmentation du bruit total dans une situation donnée qui résulte de l'introduction d'un certain bruit particulier

où

Définition 2. bruit total [[4], §3.4.1]

bruit résultant de la superposition de toutes les sources de bruit dans une situation donnée à un moment donné, généralement composé de sons provenant de nombreuses sources proches et lointaines.

et

Définition 3. bruit particulier [[4], §3.4.2]

composante du bruit total qui peut être identifiée spécifiquement et qui est associée à une source particulière.

Cette source particulière est généralement la source dont l'impact sonore doit être évalué. Pour les besoins de la discussion, il est nécessaire de définir le bruit résiduel :

Définition 4. bruit résiduel [[4] §3.4.3]

bruit total restant à une position donnée dans une situation donnée lorsque les sons spécifiques considérés sont supprimés.

Ces définitions sont identiques à celles de la version précédente de l'ISO 1996-1 [ISO1996-1:2003]. Dans la littérature, le bruit résiduel au sens de la norme ISO 1996-1 est souvent appelé *bruit ambient* (voir par exemple [5]). Cela peut prêter à confusion car le bruit ambient est également utilisé comme synonyme du bruit total défini ci-dessus dans d'autres documents [6]. Par conséquent, il n'est pas fait référence à la notion de bruit ambient dans la suite de ce document. Dans la suite, la notion de *bruit de fond (background noise)* apparaît à plusieurs reprises. Le bruit de fond peut être défini comme la composante stable du bruit résiduel.

Il est préférable d'identifier l'émergence sonore par e pour réduire le risque de confusion avec l'exposition sonore E [7]. En pratique, e est définie mathématiquement comme la soustraction du niveau de pression acoustique résiduel L_{res} du niveau de pression acoustique total L_{tot} .

$$e = L_{tot} - L_{res} \quad (1)$$

e est exprimé en décibels. Les métriques utilisées pour L_{res} et L_{tot} seront discutées plus loin. Pour compléter les notations, L_{part} représente le niveau sonore du bruit particulier dans ce qui suit.

Les concepts de bruit total, de bruit particulier et de bruit résiduel peuvent être commodément illustrés comme dans la figure 1. Selon le contexte, une source peut être considérée soit comme faisant partie du bruit résiduel, soit comme la source du bruit particulier.

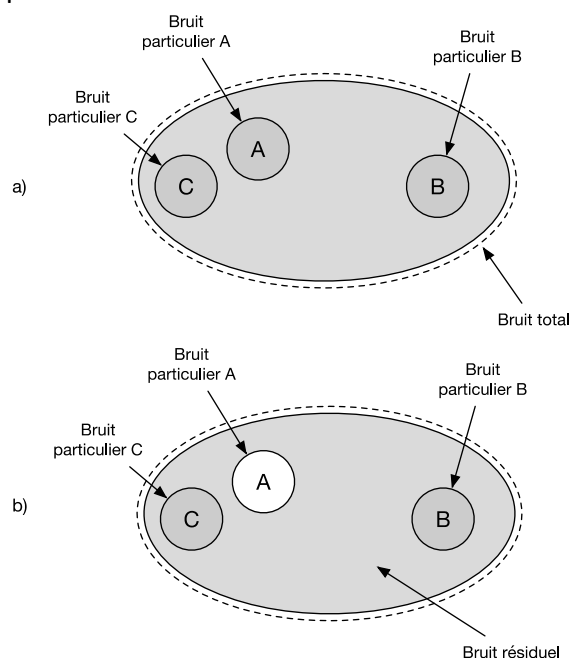


Figure 1². Bruit total, particulier et résiduel. 3 sources A, B et C sont identifiées mais d'autres sources non identifiées se combinent dans le bruit total (a). En ce qui concerne A, le bruit résiduel est observé lorsque le bruit particulier A est absent (b), toutes choses égales par ailleurs.

Bien que l'émergence sonore soit définie dans la norme ISO 1996-1 comme indiqué ci-dessus, cette définition est la seule occurrence du concept dans la série ISO 1996 qui se concentre sur la détermination des niveaux de pression acoustique. La norme n'explique pas comment l'émergence sonore peut être obtenue et ne précise pas sa signification. Les détails de la mise en œuvre sont laissés aux normes nationales. Il existe cependant deux interprétations possibles de l'augmentation à laquelle fait référence la définition de l'émergence sonore. Ce point est examiné plus en détail à la section 5.4.

3. L'émergence sonore dans les documents officiels actuels

3.1. Émergence sonore *stricto sensu*

Il apparaît que la Banque mondiale utilise le concept d'émergence sonore sans le nommer dans ses directives générales [8] qui sont visées par ses directives spécifiques comme celle pour l'éolien [9], en spécifiant une augmentation maximale des "niveaux de bruit de fond de 3

² Total, specific and residual sound. 3 sources A, B and C are identified but other non identified sources combine into the total sound (a). With respect to A, the residual sound is observed when the specific sound A is absent (b), everything else being equal.

dB au niveau du récepteur le plus proche". Cette directive est toujours associée à des valeurs limites exprimées en L_{eq} et s'applique au-delà des limites de propriété des installations bruyantes.

Alors que des limites de bruit en niveau de pression acoustique sont utilisées en France pour le bruit des infrastructures de transport, dans le cas du bruit industriel, du bruit de voisinage et des lieux musicaux, la France spécifie des valeurs limites par rapport à la différence entre le niveau de pression acoustique total (L_{tot}) et le niveau de pression acoustique résiduel (L_{res}) [2, 10, 16]. A notre connaissance, la première occurrence de telles limites différentielles de bruit se trouve dans un texte juridique [11]. Cette différence entre le niveau de pression acoustique total et le niveau de pression acoustique résiduel est appelée émergence. Dans la législation actuelle, e ne doit pas dépasser 5 dB(A) le jour et 3 dB(A) la nuit lorsque le niveau de pression acoustique total est supérieur à 45 dB(A). Lorsque le niveau de pression acoustique est compris entre 35 dB(A) et 45 dB(A), les valeurs limites deviennent respectivement 6 dB(A) et 4 dB(A). La législation française s'appuie sur la norme NF S 31-010 pour la mesure de e dans ce cas [6].

Au moment de la rédaction de cet article, cette norme est en cours de révision. Dans la législation dédiée au bruit des éoliennes, la France fixe des limites basées sur l'émergence à $5 + k$ dB(A) en période diurne (7:00-22:00) et $3 + k$ dB(A) en période nocturne (22:00-7:00) lorsque le niveau sonore total dépasse 35 dB(A) [12] où $k = 0$ dB lorsque le bruit du parc est apparent pendant plus de 8 heures sur 24 heures. Pour des durées plus courtes, k varie de 1 à 3 dB. Plutôt qu'à une norme, la législation française se réfère ici à un protocole spécifique d'évaluation de l'impact acoustique d'un parc éolien [13] où l'émergence sonore repose sur le LA50. La gestion française du bruit de voisinage est également fondée sur l'émergence en dB(A) ou en bandes d'octave [14]. En dB(A), on utilise une approche similaire à celle utilisée pour le bruit industriel, mais k peut prendre des valeurs de 1 à 6 lorsque la durée cumulée d'apparition du bruit à réglementer passe de moins de 8 heures à 1 minute. L'émergence spectrale ne doit pas être confondue avec la tonalité [15]. La première est définie dans une bande d'octave. Les valeurs limites de l'émergence spectrale sont de 7 dB pour les octaves 125 à 250 Hz et de 5 dB pour les octaves 500 à 4000 Hz. La législation française sur les bruits et sons amplifiés fixe à 3 dB l'émergence maximale dans les octaves 125 à 4000 Hz [16]. Le LA50 est souvent spécifié ou suggéré pour l'estimation du niveau de pression acoustique de fond, mais d'autres indicateurs sont autorisés dans le cas du bruit de voisinage [6].

Depuis 1991 [17], l'Italie définit des limites de bruit dites différentielles qui correspondent à l'émergence sonore [18,19]. Ces limites s'appliquent au bruit des installations industrielles uniquement, y compris les éoliennes [20] en dehors des zones classées comme industrielles. Les seuils sont fixés à 3 dB la nuit et 5 dB le jour, comme en France. En Italie, cependant, l'émergence sonore n'est mesurée qu'à l'intérieur, et elle est toujours combinée à des limites de bruit d'immission et d'émission [18]. Lorsque les fenêtres sont ouvertes, l'émergence sonore ne s'applique que si L_{tot} est supérieur à 50 dB(A) pendant la journée et à 40 dB(A) pendant la nuit. Lorsqu'elles sont fermées, ces seuils tombent respectivement à 35 dB(A) et 25 dB(A). En Italie, l'émergence sonore est fortement orientée vers la protection du riverain puisque le cas le plus défavorable à l'émetteur entre fenêtres ouvertes et fenêtres fermées est utilisé pour évaluer la conformité. La motivation de l'introduction de l'émergence sonore dans la législation italienne est la gêne. La distance à la source n'a pas d'importance puisque la mesure est effectuée au niveau du récepteur. Les seules installations pour lesquelles la limite différentielle de bruit ne s'applique pas sont les installations construites avant 1996 qui

fonctionnent sans interruption, compte tenu de l'impossibilité d'évaluer la différence entre L_{tot} et L_{res} . Toutefois, dès que des modifications sont apportées aux installations existantes, la limite différentielle de bruit entre en vigueur [21].

3.2. Autres façons de fixer des limites de bruit par référence à L_{res}

Il existe une certaine confusion autour du concept d'émergence sonore. Certains auteurs indiquent que l'Australie et le Royaume-Uni utilisent l'émergence sonore au sens de la norme ISO 1996-1 [22] dans le cas du bruit des éoliennes. Un autre article semble aller dans le même sens en affirmant que le Royaume-Uni et l'Australie ont la même approche puisqu'ils appliquent une comparaison de L_{Aeq} avec le niveau de bruit résiduel lors de l'évaluation de la conformité [23]. Dans les deux cas, on oublie de faire la distinction entre L_{part} et L_{tot} . Seul ce dernier correspond à la définition de l'émergence sonore. En outre, la législation peut varier au sein d'un même pays, comme c'est le cas pour l'Australie. Parmi les réglementations consultables en anglais, en allemand et dans l'une des langues scandinaves, nous n'avons pu trouver aucun document où la comparaison avec le bruit de fond soit faite par rapport à L_{tot} .

En Irlande, l'approche recommandée est d'utiliser les niveaux de pression acoustique d'évaluation (*rating sound level*) pour fixer les contributions maximales admissibles des installations classées [24,25]. Cette valeur limite peut occasionnellement dépendre du niveau de bruit de fond. Dans le cas des éoliennes, les limites proposées pour les installations classées reposent sur le principe selon lequel le bruit des éoliennes doit être contrôlé par rapport à des limites absolues lorsque le bruit de fond est faible, ou par rapport au bruit de fond lui-même lorsque le bruit de fond augmente avec la vitesse du vent, la valeur la plus élevée étant retenue. Dans la pratique, ce principe est interprété de telle sorte que le bruit *imputable à l'éolienne* ne doit pas dépasser soit un certain LA_{90} , soit 5 dB au-dessus du bruit de fond [25].

Le Royaume-Uni semble utiliser des limites de bruit différentielles pour classer et évaluer les le bruit des activités industrielles et commerciales [26]. Il en va de même pour les parcs éoliens [27]. Toutefois, le critère d'évaluation s'écarte sensiblement de l'émergence sonore. La principale différence est que l'objectif n'est pas d'obtenir le niveau de pression acoustique total mais le bruit *attribuable à la source*, c'est-à-dire L_{part} . L_{part} est obtenu à partir de L_{tot} (appelé niveau sonore ambiant dans [26]) via une correction classique du bruit de fond. De plus, par rapport aux réglementations française et italienne, la pratique générale au Royaume-Uni, au moins dans le cas de projets de parcs éoliens, est d'estimer L_{res} bien avant la mesure de L_{part} . Dans le cas des bruits industriels et des activités économiques, une différence entre le niveau de pression acoustique d'évaluation du bruit particulier et le niveau de pression acoustique du bruit *de fond* (*background sound*) qui serait égale ou supérieure à +10 dB (resp. +5 dB) est considérée comme "susceptible d'être une indication d'un *impact négatif significatif* (resp. d'un *impact négatif*)". Ces lignes directrices reconnaissent explicitement que l'impact dépend du contexte. Les indicateurs de bruit spécifiés dans [26] sont L_{Aeq} pour L_{tot} , L_{part} , L_{res} et LAF_{90} pour le bruit de fond. En ce qui concerne l'évaluation du bruit des parcs éoliens, l'indicateur à utiliser est $LA_{90,10min}$ [27]. Lorsque la différence entre L_{tot} et le niveau de bruit de fond est inférieure à 3 dB au niveau du récepteur, la mesure de L_{part} est considérée comme mal conditionnée. Il est alors recommandé de choisir des points de mesure plus proches de la source où le rapport signal/bruit (SNR) est suffisamment élevé pour que la puissance sonore de la source puisse être estimée. L_{part} au récepteur [26] peut alors être obtenu par simulation. Le seuil différentiel pour le bruit des parcs éoliens est fixé à 5 dB [27].

En Australie, la législation sur le bruit varie d'un état ou d'un territoire à l'autre. Un aperçu de la législation existante est présenté dans [28]. Bien que ce document ait été publié en 2003, la situation reste essentiellement la même, même si la plupart des directives spécifiques à chaque état ont été révisées depuis. La référence au bruit de fond dans les limites de bruit est bien représentée dans tout le pays, puisqu'au moins la Nouvelle-Galles du Sud (NSW), l'Australie-Méridionale (SA) et Victoria utilisent la règle dite "*background-plus*" (en français « bruit de fond plus ») dans leurs directives [29-31], où la différence admissible entre le L_{part} et le bruit de fond est généralement de 5 dB. De plus, la Tasmanie déclare que la conformité d'une nouvelle installation doit être évaluée en comparant son L_{part} avec le bruit de fond [32], bien qu'à notre connaissance la valeur limite ne soit pas clairement indiquée. Pour la nuit, l'augmentation admissible est abaissée à 0 dB dans la gestion du bruit de voisinage en NSW [29]. En outre, dans le cas du bruit industriel, un "niveau de bruit de fond nominal" est substitué au niveau de bruit de fond mesuré afin de fixer une limite inférieure conventionnelle au niveau de bruit de fond [33]. Le niveau de bruit de fond est également utilisé au moins en Nouvelle-Galles du Sud, dans le Queensland, en Australie Méridionale et en Tasmanie pour atténuer l'effet des autres sources bruit dans l'évaluation de L_{part} . Mais au moins trois des cinq États ou territoires australiens qui fixent des limites de bruit par rapport au niveau de bruit de fond, fixent également des limites de bruit absolu en parallèle, comme la Nouvelle Galles du Sud, le Queensland et l'Australie Méridionale.

4. Emergence, gêne et perception

4.1. L'émergence sonore est un descripteur de second ordre de la gêne

Il est bien connu que la gêne due au bruit n'est que partiellement déterminée par des facteurs acoustiques [5,34]. On peut toutefois s'attendre à ce que les paramètres utilisés pour fixer les valeurs limites du bruit soient liés aux effets sur la santé au sens large, et à la gêne en particulier. Il semble que très peu de recherches aient été menées sur les mérites de l'émergence sonore du point de vue de la santé publique. Cela avait déjà été souligné il y a plus de vingt ans [35] et n'a pas pu être contredit par nos propres recherches. Nous n'avons trouvé que deux³ articles qui traitent explicitement de la gêne et de l'émergence sonore. Le premier se concentre sur les sources de bruit liées à la production électricité [36]. Sur la base d'un test d'écoute, ses auteurs jugent que le critère d'émergence en vigueur en France est inadapté au bruit industriel et à l'évaluation de la gêne associée. Le second traite de la gêne occasionnée par les sons impulsionnels [37]. Parmi différents indicateurs possibles un autre article cité par [35] évalue ce que l'on appelle la saillance, définie comme $LA_{eq,10ms}$ - $LA_{eq,1s}$, par rapport à une évaluation subjective pour un bruit impulsionnel [38]. Dans ce contexte, la saillance peut être considérée comme un exemple d'émergence sonore. Les deux références trouvées à propos des bruits impulsionnels concluent que les critères ne faisant pas

³ Voir aussi (a) Dutilleux, G. et Fosset, J. (2020). *Comparing sound emergence and sound pressure level as predictors of short-term annoyance from wind turbine noise*. Acta Acustica, 4(3):9, et (b) Ruaud, E. et Dutilleux, G. (2022). *Comparaison de l'émergence sonore et du niveau de pression acoustique pour la mesure de la gêne causée par les sons éoliens*. In 16ème Congrès Français d'Acoustique, pages 1–7, Marseille, France. Société Française d'Acoustique. Sur la base des tests d'écoute, ces articles concluent également que la gêne sonore de court terme est beaucoup mieux prédite par L_{tot} que par e . Le second constate de plus que l'émergence quantifiée lorsque le bruit particulier est audible est moins bien corrélée avec la gêne que l'émergence quantifiée lorsque le bruit particulier est émis.

référence au niveau de bruit résiduel donnent de meilleurs résultats que l'émergence sonore. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas de courbe dose-réponse publiée qui repose sur l'émergence sonore.

Au contraire, une vaste méta-analyse portant sur 136 enquêtes a conclu, entre autres, que "la gêne due au bruit n'est pas affectée de manière importante par les niveaux sonores résiduels" [5,39]. Les enquêtes utilisées sont sélectionnés à partir d'un très large échantillon d'enquêtes de terrain. La sélection a été effectuée sur la base de cinq critères : (1) l'effet du résiduel est-il aussi fort que celui d'une augmentation de 3 dB(A) du niveau de bruit particulier, (2) le bruit résiduel entraîne-t-il une augmentation de 5% du nombre de personnes gênées, (3) le bruit résiduel explique-t-il 1% de la variance de la gêne, (4) l'effet du bruit résiduel est-il statistiquement significatif et (5) existe-t-il une association verbale entre le bruit résiduel et la gêne. Cependant, les enquêtes analysées traitaient principalement du bruit des avions et du trafic routier comme source de bruit particulier. Il n'en reste pas moins que le bruit des transports englobe une grande variété de sons, tant réguliers qu'instables, avec ou sans tonalités, et différents degrés de contrôle sur la source du bruit particulier pour les personnes interrogées. Une autre limite de cette analyse est que l'extrémité inférieure de la gamme des niveaux de pression acoustique est quelque peu sous-représentée dans les enquêtes analysées.

4.2. L'émergence n'est qu'une approximation du rapport signal/bruit SNR lorsque celui-ci est élevé.

Selon l'hypothèse de la sommation incohérente, l'émergence sonore peut être liée au rapport signal/bruit (noté SNR pour *Signal-to-Noise-Ratio*) en dB. A partir de l'équation (1), on peut écrire

$$e = 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{SNR}{10}} \right) \quad (2)$$

Comme l'illustre la figure 2, e est une bonne approximation du SNR à condition que ce dernier soit supérieur à environ 10 dB. Mais la plage de $SNR \leq 0$ dB est comprimée dans un intervalle très étroit d'émergence sonore puisque cette plage de SNR correspond à $0 \leq e < 3$ dB où $e = 3$ dB correspond à $SNR = 0$ dB.

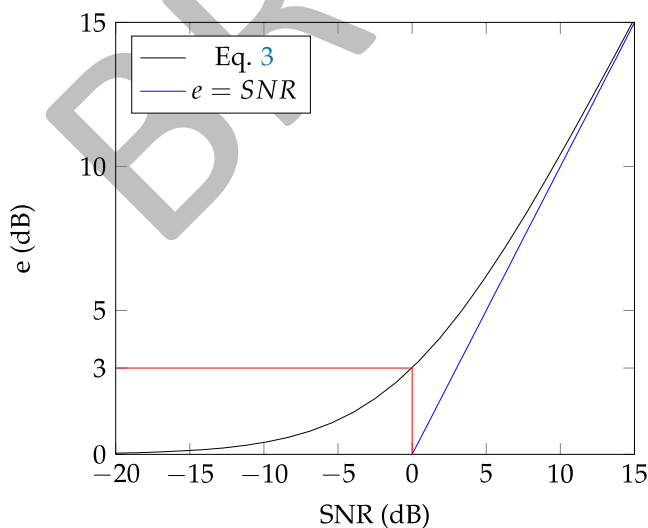


Figure 2. Relation entre le rapport signal/bruit (SNR) et e .⁴

4.3. L'émergence sonore ne reflète pas la détectabilité

Les origines de l'émergence sonore ne sont pas clairement établies. Cependant, si l'on prend en compte (1) que l'utilisation de cet indicateur est limitée à des niveaux de pression acoustique plus faibles, (2) que les normes nationales mettant en œuvre l'émergence sonore se réfèrent explicitement à la détectabilité et (3) que l'émergence sonore est définie par référence au L_{res}, une hypothèse possible est que l'émergence sonore ait été introduite comme un indicateur de détectabilité d'une source particulière dans l'environnement sonore. Il est bien connu qu'un son qui atteint la conscience d'une personne et qui est clairement identifié peut être extrêmement gênant, même si son niveau de pression acoustique est faible [40]. Le lien entre SNR et e peut aider à évaluer la capacité de l'émergence à déterminer si un bruit particulier peut être entendu ou non.

La détectabilité des faibles niveaux a été étudiée dans [41] pour une variété de stimuli acoustiques allant de 38 à 70 dB(A) combinés à différents types de sons masquants. Cette recherche montre une forte corrélation entre le jugement subjectif et une mesure de la détectabilité qui est proportionnelle au SNR. De plus, les mêmes auteurs ont démontré que la détectabilité n'est pas limitée à des valeurs positives de SNR [42]. Pour le cas spécifique des éoliennes, ceci est documenté dans une recherche plus récente où des sons d'éolienne ont été détectés à un SNR = -8 dB [43]. En outre, [44] estime que le seuil de détection d'un bruit éolien en présence de bruit routier se situe à SNR = -23 dB(A). Avec de tels seuils de détection, les valeurs limites typiques actuelles de e = 3 dB pour la nuit ne permettent pas de s'assurer que le bruit particulier ne sera pas détecté par une grande partie de la population vivant dans le voisinage d'un parc éolien si cette limite est respectée.

Si la figure 2 montre que e est très proche du SNR lorsque ce dernier est fortement positif, ce n'est pas le cas lorsque le SNR est négatif. En conclusion, e ne reflète pas l'audibilité dans la plage de SNR où une source particulière est susceptible d'être détectée et ne permet pas de décider si un bruit particulier peut être entendu ou non.

4.4. La relation entre la gêne et la force de l'émergence sonore

Supposons maintenant que l'émergence sonore soit censée être un indicateur de la gêne. Il existe des preuves solides que différentes sources de bruit ne sont pas également gênantes pour un même niveau de pression acoustique équivalent [15,45]. Ce fait est pris en compte dans les normes de mesure qui prévoient différentes pénalités pour tenir compte de l'impulsivité, du contenu en basses fréquences ou de la tonalité [15]. Dans les réglementations existantes qui utilisent l'émergence sonore, le seuil n'est cependant pas dépendant de la source mais commun aux larges catégories de bruit industriel ou de bruit de voisinage. Il est cependant prouvé que toutes les sources de bruit industriel ne sont pas aussi gênantes au même niveau d'émergence sonore [36]. Les recherches montrent que même lorsque e

⁴ Relationship between signal-to-noise ratio (SNR) and e .

> 5 dB, certaines sources ne sont pas considérées comme gênantes. Ceci est attribué au large spectre du bruit particulier qui a la même forme que le spectre du bruit résiduel.

5. Mesure de l'émergence sonore

5.1. Incertitude de mesure

Etant donné que l'émergence sonore est définie comme une différence de niveaux de pression acoustique, le bilan d'incertitude de e est moins favorable que celui d'un niveau de pression acoustique individuel. Toutes choses égales par ailleurs, dans le cas général où il n'y a pas de corrélation entre L_{part} et L_{res} , l'incertitude totale attachée à l'émergence sonore est la moyenne géométrique des incertitudes des deux niveaux de pression acoustique [46]. Même avec le meilleur équipement de mesure disponible sur le marché et les conditions de mesure les plus favorables, l'incertitude métrologique ne devrait pas être inférieure à 0.7 dB lorsqu'un sonomètre de classe I est utilisé [47]. En supposant un intervalle de confiance de 95% et un intervalle unilatéral, l'incertitude étendue est de 1.15 dB dans ce cas. La présence de composantes tonales dans le signal peut conduire à des incertitudes liées à l'instrument beaucoup plus importantes [48]. Une estimation plus réaliste devrait inclure les composantes de représentativité et de reproductibilité. Si ces éléments sont pris en compte, il est très peu probable que l'incertitude étendue soit inférieure à 1.5-2 dB. De plus, si l'on tient compte du fait que les valeurs seuils légales peuvent être aussi basses que 3 dB, établir la conformité d'une source de bruit sera problématique dès que les incertitudes seront prises en compte.

5.2. Bruit particulier en pratique

En pratique, décider si le bruit particulier est présent ou non est une question de perspective. On peut distinguer au moins deux points de vue : celui de la source ou celui du récepteur.

Du point de vue de la source, le bruit particulier est présent dans le bruit total lorsque la source du bruit particulier émet un son. L'avantage de cette approche est que la documentation du fonctionnement de la source est assez simple et fiable en utilisant des moyens acoustiques, à condition que l'on ait accès au voisinage de la source. Des moyens non acoustiques peuvent également être utilisés, par exemple dans le cas d'une usine où les heures de fonctionnement et le processus de fabrication sont bien connus. Mais le fait que la source d'un bruit particulier soit active n'implique pas qu'elle soit perçue par le récepteur.

Du point de vue du récepteur, le bruit particulier est présent dans le bruit total si le bruit particulier est audible. En général, l'audibilité ne peut pas être documentée par un sonomètre. Elle nécessite plutôt la présence d'un opérateur humain qui sera capable de détecter le bruit particulier dans le bruit total. Dans l'état actuel de la technologie, cette tâche n'est pas facilement automatisable, bien que la séparation aveugle des sources soit un domaine de recherche assez actif [49]. Certains auteurs ont développé une méthode spécifique pour la séparation du bruit des éoliennes du bruit de fond afin d'évaluer la conformité d'un parc éolien par rapport à la législation italienne [20]. La procédure développée fait cependant des hypothèses fortes sur le bruit de fond, à savoir que le bruit résiduel ne dépend que du vent et que le vent au sol n'est pas corrélé au vent à hauteur de moyeu. Cette hypothèse a été rapportée comme fonctionnant dans les zones rurales [50] mais elle ne sera pas satisfaite partout. En outre, la méthode peut ne pas se généraliser facilement à d'autres sources de bruit de voisinage ou de bruit industriel. La perspective du récepteur semble plus pertinente lorsqu'il s'agit d'évaluer la réponse des riverains. Cependant, elle rend l'estimation du bruit

particulier dépendante de l'opérateur. Dans l'optique d'une standardisation des procédures de mesure du bruit sur le terrain, cela serait problématique car cela compromettrait la reproductibilité des mesures. Premièrement, bien que la médiane du seuil d'audition de la population otologiquement saine soit bien documentée [51], la dispersion autour de cette moyenne reste à évaluer [52], en dehors peut-être de la tranche des jeunes adultes. Deuxièmement, la perte auditive est une pathologie qui peut passer inaperçue pendant longtemps, en particulier lorsque la perte auditive n'affecte pas la compréhension de la parole [53]. De plus, dans de nombreux pays, les tests auditifs ne font pas partie de la routine des examens de santé au travail. Troisièmement, lors de l'écoute d'un bruit particulier, des facteurs humains peuvent interférer, comme l'attention, la concentration et la connaissance de la variabilité de la source du bruit particulier.

La perspective du récepteur fixe également des limites à la durée de l'intervalle d'observation. En l'absence d'estimation du bruit particulier par un appareil de mesure, cette tâche ne peut être effectuée que sur des mesures à court terme, c'est-à-dire guère au-delà de quelques heures d'écoute, alors qu'on peut affirmer que la conformité d'une installation bruyante devrait en général être évaluée sur une période plus longue, pour des raisons de représentativité. Plus la variabilité de la source étudiée et la distance entre la source et le récepteur augmentent, plus l'incertitude de l'estimation du bruit particulier augmente.

5.3. Le bruit résiduel en pratique

Alors que le bruit résiduel se distingue facilement du bruit total dans une image comme celle de la figure 1, en pratique il n'est pas toujours évident d'estimer L_{res} , car ce qui est capté par le microphone est le bruit total. En général, la source n'est pas sous le contrôle de l'opérateur chargé de l'évaluation de l'impact sonore.

De plus, dans de nombreux cas, la source fonctionne en permanence avec une émission sonore assez stable. L'arrêt d'une telle source peut être coûteux ou tout simplement impossible. Le réseau électrique fournit plusieurs exemples où l'estimation du bruit résiduel est un défi. Tout d'abord, l'arrêt d'un parc éolien est possible mais entraîne des pertes de revenus importantes pour l'opérateur. Ensuite, l'arrêt d'une grande installation comme une centrale nucléaire est un processus très long qui soulève la question de la redondance du réseau électrique afin que la perte de production puisse être compensée par une autre centrale. A l'autre bout des réseaux électriques, l'évaluation de l'émergence sonore d'un transformateur électrique peut signifier une coupure de courant pour des centaines de personnes ou des services stratégiques comme un hôpital.

Comme déjà mentionné pour le bruit particulier, la séparation aveugle des sources n'est pas encore disponible sur étagère. De plus, comme nous le détaillerons plus loin, la modélisation du bruit résiduel en remplacement des mesures est une tâche difficile avec de nombreuses inconnues et de grandes incertitudes qui ne sont pas compatibles avec des valeurs limites basées sur l'émergence. Pour résoudre ce problème, une approche courante consiste à estimer le niveau de pression acoustique résiduel à un autre endroit qui soit suffisamment éloigné de la source du bruit particulier qui ne peut être arrêtée. Cela pose bien sûr des problèmes de reproductibilité et de représentativité. Alternativement, il est possible de profiter des phases de maintenance pour mesurer le niveau de pression acoustique résiduel

au bon endroit mais en faisant face au risque de non-contemporanéité entre l'estimation de la source de bruit particulier et de celle du bruit résiduel. Le problème de la source que l'on ne peut pas arrêter n'a pas de solution parfaite et toutes les limites de bruit qui se réfèrent à Lres sont confrontées à ce problème, pas seulement l'émergence sonore.

5.4. Hypothèse de source incohérente

La signification du terme "augmentation" dans la définition de l'émergence sonore peut également être une question d'interprétation. "Augmentation" peut être compris au sens algébrique, de sorte que e pourrait prendre des valeurs négatives. Dans l'hypothèse de sources cohérentes, en supposant que le bruit résiduel contient le son d'une source sonore A, il est théoriquement possible d'observer une diminution locale du niveau de pression acoustique lorsqu'une source sonore B rayonne, surtout si A et B produisent un bruit tonal à la même fréquence. Cela peut se produire en pratique, par exemple dans le cas d'usines qui combinent plusieurs unités identiques générant des basses fréquences.

Les interférences destructives, cependant, ne sont pas attendues pour la plupart des sources de bruit du monde réel aux distances habituelles des récepteurs. En effet, l'hypothèse sur laquelle repose l'émergence sonore est celle d'une sommation incohérente des contributions du bruit résiduel et du bruit particulier si bien que $e \geq 0$ dB.

5.5. Une variété d'indicateurs

Comme nous l'avons mentionné, la norme ISO 1996-1 n'entre pas dans les détails concernant l'évaluation pratique de l'émergence sonore et notamment la métrique à utiliser pour la quantification du niveau de pression acoustique d'un bruit particulier. Cet aspect est au moins partiellement abordé dans une norme nationale [6]. Ce document laisse l'opérateur de mesure libre de choisir une mesure appropriée entre les niveaux de pression acoustique équivalents Leq,T , où la constante de temps T n'est pas spécifiée, et les niveaux de pression acoustique fractiles LX , où le seuil n'est pas non plus spécifié, fractiles qui sont dérivés des séries temporelles de Leq . La grande liberté laissée quant à la spécification de la métrique utilisée pour le bruit résiduel et pour le bruit total peut refléter l'absence de consensus sur les métriques appropriées pour l'évaluation de différents mélanges de sons environnementaux. La conséquence est que différents bureaux d'études en acoustique peuvent décider de choisir des métriques différentes pour la même source, ce qui ne peut que compromettre la reproductibilité des mesures d'émergence.

6. Emergence et projets d'aménagements

Étant donné que l'émergence est définie par rapport au bruit résiduel, la fixation de limites de bruit basées sur l'émergence sonore est problématique pour toutes les parties prenantes car le respect de ce type de valeur-limite est à la fois difficile à prévoir et difficile à vérifier à long terme.

6.1. Vu de la source

Premièrement, l'émergence est problématique pour le propriétaire ou l'exploitant d'une installation bruyante, car les limites de bruit basées sur l'émergence offrent peu d'assurance

quant à la conformité à long terme de l'installation vis-à-vis des limites de bruit. On peut supposer que l'exploitant maîtrise bien les émissions sonores de l'installation et que ces émissions peuvent être maintenues au même niveau de pression acoustique que celui spécifié ou observé lors de l'étude d'impact environnemental.

Mais, à l'inverse, l'exploitant a peu de contrôle sur les variations du bruit résiduel. Par exemple, une usine A peut être située à proximité d'une autre usine B bruyante. Dans l'étude d'impact sur l'environnement de l'usine A, le bruit de l'usine B contribue à la définition du bruit résiduel dans le voisinage des usines A et B. Si l'usine B fait faillite ou est déplacée, la diminution du niveau de bruit résiduel est à prévoir et la conformité de l'usine A en matière de bruit est compromise. D'autres modifications de l'environnement peuvent avoir des conséquences similaires, comme la construction d'un bâtiment ou d'une barrière entre l'usine B et le voisinage. Un tel aménagement réduirait évidemment la contribution de l'installation B au niveau sonore résiduel et pourrait compromettre la conformité de l'installation A.

Comme il est très difficile de prédire l'émergence sonore à l'aide de logiciels de simulation, l'émergence sera mesurée. Mais la durée de la campagne de mesure sera limitée par des considérations financières et pratiques. Par conséquent, les mesures seront rarement effectuées sur plus de quelques jours. Cela empêche de documenter les variations saisonnières. Si l'étude d'impact acoustique est effectuée bien avant la période de végétation, le bruit résiduel peut être fortement influencé par l'interaction du vent avec le feuillage, alors que cette composante sera plus ou moins absente en dehors de la période de végétation dans le cas des arbres à feuilles caduques. Mais la végétation n'est pas le seul paramètre soumis à des variations induisant des variations saisonnières du niveau sonore résiduel. On peut également citer les vents saisonniers, la couverture neigeuse et les activités humaines saisonnières, et le rythme de la nature (oiseaux, insectes, amphibiens).

6.2. Le point de vue des riverains

Deuxièmement, l'émergence est problématique pour les riverains car la référence au bruit résiduel dans la limite de bruit établit une référence flottante (*shifting baseline* [54]). En d'autres termes, elle offre peu de protection, voire aucune, contre des niveaux de bruit plus élevés. Imaginons un environnement rural vierge de toute activité bruyante. L'usine A peut être autorisée à fonctionner sans interruption après l'évaluation de l'impact sur l'environnement parce que le niveau d'immission dans le voisinage n'est pas supérieur à $L_{res} + n$ décibels. Si, quelques années plus tard, une autre usine B veut fonctionner dans la même zone, le niveau sonore résiduel de référence pour l'usine B sera alors de $L_{res} + n$, toutes choses restant égales par ailleurs, et la conséquence du fonctionnement continu de l'usine B peut conduire à des niveaux sonores aussi élevés que $L_{res} + 2n$. Au fur et à mesure que de nouvelles activités bruyantes apparaissent dans les environs, le bruit peut encore augmenter en raison du déplacement de la référence du niveau de bruit résiduel. A moins que des limites de L_{tot} ne soient introduites comme celles définies dans [25] ou dans la législation italienne [21], la limite ne sera fixée que par le manque de terrains disponibles.

6.3. Prévoir l'émergence

Troisièmement, l'émergence est problématique car elle est très difficile à prévoir avec une bonne confiance. Là encore, le principal problème est la référence au bruit résiduel. Le bruit

résiduel est a priori un mélange d'une grande variété de sources. Cela soulève plusieurs défis. Le premier est d'identifier les sources. Il peut s'agir de ruisseaux, du bruit du vent dans le feuillage des arbres et des arbustes, des oiseaux pendant le chœur de l'aube, d'insectes, d'amphibiens, de structures allongées qui chantent dans le vent, de divers appareils et équipements présents dans l'environnement comme les pompes à chaleur, du trafic routier et ferroviaire et du bruit industriel. Cela implique une enquête sur une large zone.

A supposer que cette étude puisse être menée à bien, la modélisation physique de l'émission, de la distribution spatiale, du cycle de fonctionnement de ces sources multiples n'est pas une tâche évidente et demande beaucoup d'efforts. Certaines des sources énumérées peuvent sembler d'importance mineure et il est certainement possible d'effectuer un classement et de se concentrer sur les sources les plus contributives, mais dans les environnements ruraux, comme dans le cas du développement de l'énergie éolienne, il est probable que la simulation du niveau sonore résiduel nécessite la prise en compte de sources dont la modélisation n'est pas bien établie. De plus, à l'heure où nous écrivons ces lignes, il n'existe pas de modèle macroscopique fiable pour Lres. Les tendances spectrales générales sont bien connues [55] mais la calibration est problématique et l'évaluation de l'émergence doit toujours être effectuée à un endroit spécifique avec des sources spécifiques.

En outre, une difficulté supplémentaire provient du fait que Lres peut être aussi bas que 30-35 dB. Il est bien connu que les méthodes actuelles de prévision du bruit ne sont pas conçues pour la simulation de niveaux aussi bas. Tout ceci tranche avec l'approche générale des études d'impact acoustique où les valeurs limites sont exprimées en niveaux de bruit. Les simulations sont une opération de routine et si la réglementation fixe des limites à la contribution de la source étudiée, la modélisation peut se concentrer sur l'infrastructure/l'usine/la source étudiée et laisser de côté les autres sources, ce qui est une tâche beaucoup plus accessible. Cela permet d'étudier les valeurs moyennes annuelles en tenant compte des variations saisonnières des émissions et du milieu de propagation, ainsi que les tendances à long terme. Tout ceci est bénéfique à la stabilité de la conformité des installations bruyantes et à la protection des riverains.

7. Conclusions et recommandations

Nous avons examiné l'utilisation des valeurs limites d'émergence sonore dans la législation et d'autres documents officiels. Les valeurs limites d'émergence sonore se référant au bruit de fond semblent être utilisées dans un petit nombre de textes juridiques à travers le monde. Le niveau de bruit de fond peut être utilisé pour définir l'état initial du paysage sonore d'un lieu avant de fixer la contribution maximale admissible pour la source sonore spécifique à réglementer, ou pour fixer le niveau de pression acoustique admissible du bruit total. Certains pays, cependant, préfèrent exprimer la limite de bruit en temps réel par une référence directe à la différence entre le niveau de pression acoustique total et le niveau de pression acoustique résiduel. Parfois, la différence autorisée peut être aussi faible que 3 dB(A) et cette différence est censée être obtenue à partir de mesures.

Dans cet article, la pertinence de l'émergence sonore a été évaluée du point de vue de la perception et de la gêne, de celui de la pratique de la mesure et de celui du développement

d'activités. La littérature indique qu'il y a peu de preuves, voire aucune, que l'émergence sonore ne soit un meilleur critère que le niveau de pression acoustique, car le bruit résiduel est un paramètre de second ordre dans la détermination de la gêne. De plus, l'émergence sonore ne permet pas de prédire l'audibilité d'un bruit particulier. D'un point de vue pratique, la mesure de l'émergence soulève plusieurs questions relatives à la définition du bruit particulier, à l'accès au bruit de résiduel et à l'incertitude de la mesure. En outre, l'émergence sonore est problématique du point de vue des études d'impact car cet indicateur repose sur la référence flottante du bruit résiduel. Par conséquent, l'émergence sonore offre peu de garantie de conformité aux différentes parties prenantes. En outre, la nécessité de prévoir le bruit résiduel rend la simulation de l'émergence plus difficile et plus incertaine que celle du niveau de pression acoustique d'une source spécifique.

A partir de tout cela, il semblerait raisonnable de reconsidérer l'utilisation de l'émergence sonore dans les législations qui s'appuient sur elle. Le poids de l'histoire ne suffit pas. Des recherches sont nécessaires pour établir la pertinence de l'émergence sonore s'agissant de fixer des limites de bruit dans l'environnement. Des recherches supplémentaires sur la corrélation entre la gêne et l'émergence sonore de sources spécifiques sont nécessaires. En raison du développement rapide de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale, la justification de l'utilisation de l'émergence sonore dans l'évaluation de l'impact environnemental des parcs éoliens mérite certainement d'être étudiée. Comme l'émergence sonore semble être un mauvais prédicteur de l'audibilité, les caractéristiques temporelles et spectrales de la source spécifique devraient être prises en compte dans l'estimation de l'émergence sonore, ce qui conduirait à des choix spécifiques à la source pour les paramètres utilisés dans l'estimation du niveau de bruit total et du niveau de bruit résiduel.

S'il est hors de question de passer à une autre métrique que l'émergence, nous pouvons vous faire les recommandations suivantes :

(1) le bruit particulier doit être défini du point de vue de la source, (2) les paramètres utilisés pour le bruit résiduel et le bruit particulier doivent être spécifiés sans ambiguïté, (3) l'estimation de l'émergence doit être basée sur des mesures à long terme pour tenir compte de la variabilité du bruit résiduel et du bruit particulier et (4) l'émergence sonore doit être utilisée en combinaison avec des valeurs limites basées sur les niveaux sonores pour éviter le phénomène de la référence flottante. Des tentatives ont déjà été faites dans ce sens, mais elles ne sont pas pleinement satisfaisantes. A notre avis et dans le sillage de [35], combiner (i) une estimation de l'audibilité du bruit particulier au récepteur et (ii) une estimation de L_{part} serait de loin supérieur à l'émergence sonore tout en servant les mêmes objectifs. L'évaluation de l'audibilité pourrait s'appuyer sur les recherches précédentes mentionnées ci-dessus [41]. En ce qui concerne L_{part} , cette quantité devrait être obtenue avec un rapport signal/bruit suffisant. Il faudra peut-être pour cela accepter que le bruit attribuable à la source au niveau du récepteur ne soit pas toujours accessible aux mesures directes du niveau de pression acoustique et que des simulations soient nécessaires.

Remerciements

Le premier auteur tient à remercier les membres de la commission française de normalisation des bruits de l'environnement AFNOR/S30J pour les nombreuses discussions qui lui ont permis d'identifier les différentes problématiques apportées par l'émergence sonore lorsqu'elle est utilisée en extérieur.

Bibliographie

- [1] Schafer, R.M. The Soundscape-Our Sonic Environment and the Tuning of the World, 2e édition ; Destiny Books : Rochester, VT, USA, 1977.
- [2] I-INCE. Survey of Legislation, Regulations, and Guidelines for Control of Community Noise ; Report 09-1 ; International Institute of Noise Control Engineering : Petaluma, CA, USA, 2009.
- [3] ISO. Acoustique, évaluation du bruit en fonction de la réaction de la collectivité ; norme ISO/R1996 ; Organisation internationale de normalisation : Genève, Suisse, 1971.
- [4] ISO. Acoustique, description, mesurage et évaluation du bruit ambiant - Partie 1 : grandeurs de base et procédures d'évaluation ; norme ISO 1996-1:2016 ; Organisation internationale de normalisation : Genève, Suisse, 2016.
- [5] Fields, J.M. Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. J. Acoust. Soc. Am. 1993, 93, 2753-2763.
- [6] AFNOR. Acoustique, Caractérisation et Mesurage des Bruits dans L'environnement, Méthode Particulière de Mesurage ; Norme NF S 31-010 ; Association Française de Normalisation : Saint-Denis, France 1996.
- [7] ISO. Grandeurs et unités, Partie 8:Acoustique ; Norme ISO 80000-8:2007 ; Organisation internationale de normalisation : Genève, Suisse, 2007.
- [8] Banque Mondiale. Environmental, Health, and Safety General Guidelines (anglais) ; Number 112110, International Finance Corporation E&S ; World Bank Group : Washington, DC, USA, 2007.
- [9] Banque Mondiale. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Wind Energy ; Number 110346, International Finance Corporation E&S ; World Bank Group : Washington, DC, USA, 2015.
- [10] Premier ministre . Arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis par les installations classées pour la protection de l'environnement. J. Off. De La République Française 1997, 73, 4785.
- [11] Commission technique d'étude du bruit. Avis du 21 juin 1963 concernant l'estimation des troubles produits par l'excès de bruit. J. Off. De La République Française 1963.
- [12] Premier Ministre. Arrêté du 10 décembre 2021 modifiant l'arrêté du 26 août 2011 modifié relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement. J. Off. De La République Française 2021, 0295, Texte n°11.
- [13] Ministère de la Transition Ecologique, Protocole de mesure acoustique d'un parc éolien terrestre, version du 22 mars 2022.
- [14] Premier ministre. Décret n°2006-1099 du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage et modifiant le code de la santé publique (dispositions réglementaires). J. Off. De La République Française 2006, 202, 13042.
- [15] ISO. Acoustique, méthode objective d'évaluation de l'audibilité des tonalités dans le bruit, méthode d'Engineering ; norme ISO/PAS 20065:2016 ; Organisation internationale de normalisation : Genève, Suisse, 2016.
- [16] Premier Ministre. Décret n ° 2017-1244 du 7 août 2017 Relatif à la Prévention des Risques Liés aux Bruits et aux Sons Amplifiés. J. Off. De La République Française 2017, 0185, 101105.
- [17] Presidente del Consiglio dei Ministri. Decreto, Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno. Gazz. Uff. 1991, 57.

- [18] Presidente del Consiglio dei Ministri. Decreto, Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore. Gazz. Uff. 1997, 280.
- [19] Ministère de l'Environnement et de la Tutelle du Territoire. Circolare 6 settembre 2004- Interpretazione in materia di inquinamento acustico : Criterio differenziale e applicabilità dei valori limite differenziali. Gazz. Uff. 2004, 217.
- [20] Gallo, P. ; Fredianelli, L. ; Palazzuoli, D. ; Licitra, G. ; Fidecaro, F. A procedure for the assessment of wind turbine noise. Appl. Acoust. 2016, 114, 213-217.
- [21] Ministero dell'Ambiente. Decreto, Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico. Gazz. Uff. 1998, 76.
- [22] Schild, J. ; Chavand, V. State of the art and the new perspective for the development of noise regulation of wind farms. In Proc Wind Turbine Noise ; INCE Europe, Southport, UK, 2015.
- [23] Koppen, E. ; Fowler, K. International legislation for wind turbine noise. Dans les Actes de la conférence Euronoise ; NAG, ABAV : Maastricht, Pays-Bas, 2015 ; pp. 321-326.
- [24] Kelly, D. ; Dilworth, C. Guidance Note for Noise : Licence Applications, Surveys and Assessment in Relation to Scheduled Activities (NG4) ; Rapport technique ; Environmental Protection Agency-Office of Environment Enforcement : Wexford, Irlande, 2016.
- [25] McAleer, S. ; McKenzie, A. Guidance Note on Noise Assessment of Wind Turbine Operations at EPA Licensed Sites (NG3) ; Technical Report ; Environmental Protection Agency-Office of Environment Enforcement : Wexford, Ireland, 2011.
- [26] BSI. Méthodes de notation et d'évaluation du son industriel et commercial ; norme BS 4142:2019 ; British Standards Institution : Londres, Royaume-Uni, 2019.
- [27] ETSU. The Assessment and Rating of Noise from Wind Farms ; Technical Report R97 ; Energy Technology Support Unit : Harwell, UK, 1997.
- [28] Burgess, M. ; Renew, W. Overview of environmental noise policies in Australia . Acoust. Aust. 2003, 31, 5-9.
- [29] EPA New South Wales. *Noise Guide for Local Government*; Environment Protection Authority : Sydney, Australie, 2013.
- [30] EPA Southern Australia. Wind Farm Environmental Noise Guideline ; Environment Protection Authority : Adelaide, Australie, 2009.
- [31] EPA Victoria. Noise Control Guidelines ; Technical Report 1254 ; Environmental Pollution Authority : Melbourne, Australie, 2008.
- [32] Environment Division. Noise Measurement Procedures, 2nd ed. ; Department of Environment, Parks, Heritages and the Arts : Hobart, Australia, 2008.
- [33] EPA New South Wales. Projet de directive sur le bruit industriel ; Autorité de protection de l'environnement : Sydney, Australie, 2015.
- [34] Stallen, P.J. A theoretical framework for environmental noise annoyance. Noise Health 1999, 1, 69-80.
- [35] Aubrée, D. ; Rapin, J.M. Les Indices de Bruit et la Gêne ; Rapport technique GA 712/92-192/DAJMR/YC ; CSTB : Grenoble, FR, 1993.
- [36] Viollon, S. ; Marquis-Favre, C. ; Junker, F. ; Baumann, C. Environmental assessment of industrial noises annoyance with the criterion "sound emergence". In Proceedings of the ICA, Kyoto, Japon, 4-9 avril 2004.
- [37] Rumeau, M. Etude d'un indicateur de gêne due aux bruits impulsifs. Acta Acust. 1994, 2, 497-504.

- [38] Berry, B. Recent advances in the measurement and rating of impulsive noise. In Proceedings of the 13th International Congresses on Acoustics ; Sava Centar : Belgrade, Republika Srbija, 1989 ; Volume 3, pp. 147-150.
- [39] Fields, J.M. Impact of ambient noise on noise annoyance : An assessment of the evidence. In INTERNOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings ; Daigle, G.A., Stinson, M.A., Eds. ; Noise Control Foundation : Toronto, ON, Canada, 1992.
- [40] Bütikofer, R. ; Eggenschwiler, K. ; Steiner, E. Annoying low level sound. Dans les actes de l'ICBEN, Zürich, Suisse, 18-22 juin 2017 ; p. 6.
- [41] Fidell, S. ; Teffeteller, S. ; Horonjeff, R. ; Green, D. Predicting annoyance from detectability of low-level sounds. J. Acoust. Soc. Am. 1979, 66, 1427.
- [42] Fidell, S. ; Pearsons, K.S. ; Bennet, R. Prediction of aural detectability of noise signals. Hum. Factors 1974, 16, 373-383.
- [43] Bolin, K. ; Kedhammar, A. ; Nilsson, M.E. The influence of background sound on loudness and annoyance of wind turbine noise. Acta Acust. United Acust. 2012, 98, 741-748.
- [44] Van Renterghem, T. ; Bockstael, A. ; De Weirt, V. ; Botteldooren, D. Annoyance, détection et reconnaissance du bruit des éoliennes. Sci. Total. Environ. 2013, 456-457, 333-345.
- [45] Miedema, H.M.E. ; Vos, H. Noise annoyance from stationary sources: Relationships with exposure metric day-evening-night level (DENL) and their confidence intervals. J. Acoust. Soc. Am. 2004, 116, 334-343.
- [46] Comité commun pour les guides en métrologie WG1. Evaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) ; Norme JCGM 100 ; BIPM : Sèvres, France, 2008.
- [47] CEI. Electroacoustique - Appareils de mesure du niveau sonore - Partie 1 : Spécifications ; Norme IEC 61672-1 ; Commission électrotechnique internationale : Genève, Suisse, 2013.
- [48] Casini, D. From standard specifications to LAeq uncertainty in environmental noise measurements. Acta Acust. 2018, 104, 707-719.
- [49] Vincent, E. ; Virtanen, T. ; Gannot, S. (Eds.) Audio Source Separation and Speech Enhancement ; Wiley : Hoboken, NJ, USA, 2018.
- [50] Fredianelli, L. ; Gallo, P. ; Licitra, G. ; Carpita, S. Analytical assessment of wind turbine noise impact at receiver by means of residual noise determination without the windfarm shutdown. Noise Control Eng. J. 2017, 65, 417-433.
- [51] ISO. Acoustique, Contours normaux d'égalité de niveau de bruit ; Norme ISO 226:2003 ; Organisation internationale de normalisation , Genève, Suisse, 2003.
- [52] Fastl, H. ; Zwicker, E. Psychoacoustics : Facts and Models ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2007 ; Volume 22, pp. 1-463.
- [53] Daniel, E. Noise and Hearing Loss : A Review. J. Sch. Health 2007, 77, 225-231.
- [54] Pauly, D. Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. Trends Ecol. Evol. 1995, 10, 430.
- [55] De Coensel, B. ; Botteldooren, D. ; De Muer, T. 1/f noise in rural and urban soundscapes. Acta Acust. United Acust. 2003, 89, 287-295.