

Emissions sonores d'un parc éolien. Puissance sonore, écart en décibels et perception acoustique.

J-Bernard Jeanneret*, physicien, Dr.Sc, 7 janvier 2019

1 Introduction

Le parc éolien de Saint-Brais (CH-JU) a souvent défrayé la chronique à cause de nuisances sonores dénoncées par les habitants du village et minimisées par les exploitants du parc et Suisse-Eole. Durant l'été 2017, des dentelures ont été installées sur le bord arrière des pales pour réduire le taux de turbulences de l'air et diminuer les émissions sonores. Mais un bridage de la machine la plus proche du village a été supprimé. Mais les polémiques ont persisté. Les habitants disent n'avoir perçu que peu ou pas d'amélioration alors que Suisse-Eole et les promoteurs laissent entendre que le bruit est diminué de moitié. Cette note tente de clarifier les points litigieux, des mesures sonométriques ayant permis de quantifier les changements d'émissions. Une première partie expose les relations entre quantités physiques et acoustiques nécessaires. En seconde partie le cas de Saint-Brais est analysé en détail.

1.1 Résumé pour la partie technique

La section 2 expose la relation entre la variation de puissance d'un son et la perception du niveau sonore perçu par l'oreille humaine et le système neuro-acoustique. Si la puissance d'un flux sonore est divisée par deux ($P_2/P_1 = 0.5$, -3dB) l'intensité sonore perçue par le système auditif humain diminue de 19% seulement. Une puissance divisée par 10 ($P_2/P_1 = 0.1$, -10dB) est nécessaire pour diviser par 2 l'intensité sonore perçue.

1.2 Résumé pour le parc de St-Brais

La section 3 résume l'analyse sonométrique de l'entreprise PRONA [6] du site de St-Brais. La machine proche du village était bridée la nuit par vent fort. Le remplacement du bridage en 2017 par les dentelures laisse l'émission sonore de cette machine essentiellement inchangée. La machine plus lointaine émet une puissance sonore divisée par 2 par l'apport des dentelures. Mais sa plus grande distance améliore le bilan total en puissance sonore de 10% seulement au village, pour un niveau sonore perçu très marginal, et même imperceptible, de 3% par l'oreille humaine, voir Sect. 3.2.

Dans un communiqué de presse [8] Suisse-Eole laisse croire à une réduction de nuisance sonore d'un facteur deux. Avec des dentelures, c'est vrai pour la puissance émise, mais pas pour le niveau sonore perçu qui n'est diminué que de 19%. Et ce n'est même pas le cas à St-Brais où les dentelures ont remplacé le bridage de l'éolienne la plus proche du village. Le bilan sonore pour les habitants est pratiquement nul, voir ci-dessus. Suisse-Eole produit donc de l'"infox" à deux niveaux, ce qui est préoccupant de la part d'une association subventionnée par le Confédération.

Le seul gain de l'opération est la disparition du bridage qui augmente la production du parc. C'est au bénéfice de l'exploitant du parc, ce qui n'est pas illégitime. Mais pas à celui des habitants comme ses dirigeants et Suisse-Eole le laissent croire.

*jbernard.jeanneret@icloud.com

2 Les émissions sonores et leur perception par l'oreille humaine

Cette section donne la relation entre la variation de puissance d'un son et la perception du niveau sonore perçu par l'oreille humaine et le système neuro-acoustique. La table ci-dessous montre qu'une puissance divisée par deux ($P_2/P_1 = 0.5$, -3dB) diminue l'intensité sonore perçue de 19% seulement. Une puissance divisée par 10 ($P_2/P_1 = 0.1$, -10dB) est nécessaire pour diviser par 2 l'intensité sonore perçue.

Table 1 : Conversion entre décibel, rapport de puissance et de perception sonore.

$D_2 - D_1$	P_2/P_1	S_2/S_1	
+20.00	100.00	4.00	Pour deux valeurs de puissance sonores différentes P_1 et P_2 émises par une même source, on définit leur rapport P_2/P_1 .
+10.00	10.00	2.00	Il apparaît dans la 2ème colonne de la table ci-contre. Pour
+6.00	3.98	1.52	chaque valeur de P_2/P_1 , la table donne en décibels (dB)
+5.00	3.16	1.41	la différence correspondante $D = D_2 - D_1$ (1ère colonne).
+4.00	2.51	1.32	
+3.00	2.00	1.23	Le rapport S_2/S_1 du changement de l'intensité sonore per-
+2.00	1.58	1.15	çue consciemment par l'oreille humaine est donnée dans la
+1.00	1.26	1.07	3ème colonne.
+0.00	1.00	1.00	La définition des grandeurs utilisées pour obtenir les
-1.00	0.79	0.93	valeurs numériques sont données plus bas, avec les
-2.00	0.63	0.87	relations mathématiques nécessaires et des références
-3.00	0.50	0.81	bibliographiques.
-4.00	0.40	0.76	
-5.00	0.32	0.71	C'est le rapport S_2/S_1 qui est déterminant
-6.00	0.25	0.66	pour quantifier une changement de niveau sonore
-10.00	0.10	0.50	perçu par le système auditif humain, voir [1].
-20.00	0.01	0.25	

Le rapport S_2/S_1 est déduit de la loi de Stevens, voir Section 2.3. Déterminée expérimentalement, cette loi dérive d'une moyenne sur un grand nombre de personnes. Elle donne le niveau sonore perçu consciemment tel que donné par le système neuro-acoustique. Les éventuelles composantes subjectives additionnelles sont ici absentes. Les valeurs de la table s'appliquent aux fréquences supérieures à 200 Hz, voir Section 2.3.1 et Fig.1. La justification des chiffres de la table, les détails techniques et les références sont donnés plus bas. La Section 2.3.2 sera utile à qui veut faire un peu de mathématiques.

2.1 Définitions et historique

Quatre variables au moins sont utilisées pour quantifier les phénomènes sonores :

2.1.1 La Puissance sonore

C'est l'énergie transportée par une onde sonore qui traverse par seconde une surface d'un mètre carré. Elle est exprimée en Watt par mètre carré (W/m^2).

2.2 Le décibel

C'est une variable auxiliaire historiquement définie par l'industrie téléphonique américaine pour définir et calculer simplement l'atténuation de signaux électriques dans les câbles de transmission. Elle se calcule comme le logarithme de la puissance. Le rapport de deux puissances P_2 et P_1 s'exprime en différence de décibels par

$$D = D_2 - D_1 = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

Ce qui n'était qu'une variable auxiliaire est devenu une grandeur de référence pour l'intensité sonore perçue. Ceci parce que les premiers travaux pour chiffrer la perception sonore, faits par Weber puis Fechner, et qui datent de 1850, concluaient à une réponse logarithmique du système auditif à une puissance sonore.

2.3 Intensité acoustique perçue, à fréquence fixe et puissance variable : le Sone

Plus récemment, vers 1950, Stevens a conduit des expériences mieux contrôlées, et a conclu à une réponse psycho-acoustique décrite par une loi de puissance [1, 2, 3]. Si S est l'intensité acoustique perçue pour une puissance P , l'augmentation d'intensité perçue entre deux signaux sonores de puissance P_2 et P_1 sera

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.3} \quad (2)$$

L'unité qui qualifie la quantité S est appelée Sone. Le coefficient 0.3 dans l'Equ. 2 est un arrondi, sa précision n'étant certainement meilleure que $\simeq 10\%$.

Même si cette loi déterminée expérimentalement n'a pas la netteté d'une définition mathématique, elle est plus proche de la réalité de la perception de l'oreille humaine que la loi logarithmique des décibels. Il faut ajouter encore que la perception acoustique est différente d'une personne l'autre. La loi de Stevens a été établie comme moyenne sur une grand nombre d'individus. Des fluctuations non-négligeables de personne à personne induisent des différences de perception qui ne sont pas subjectives mais dépendent de différences individuelles de l'organe sensible de l'oreille et du traitement neurologiques des signaux auditifs. Les problématiques additionnelles (fatigue nerveuse, psychisme) et les perceptions subjectives apparaissent en sus. Ces dernières ne sont pas chiffrables, et dépassent le cadre de cette note.

2.3.1 Rapport d'intensité perçue entre différentes fréquences : le Phone

La sensibilité du système auditif varie en fonction de la fréquence du signal sonore. La variation du niveau sonore perçu avec la fréquence à puissance sonore fixe est donnée par une courbe isosonique (on devrait dire "isophonique") dans une carte fréquence / décibels, voir Figure 1 en dernière page, extraite de [4]. Chacune des courbes est identifiée par un nombre de Phones, qui est égal au nombre de décibels à 1000 Hz. *Les courbes isosoniques de Phones donnés sont proches de leur correspondant en dB pour les niveaux de puissance supérieurs à 30 dB et dans une bande de fréquence entre environs 200Hz et 2kHz, qui est la zone qui importe dans un parc éolien (carré rouge dans Fig. 1). Voir aussi la Fig. 2 extraite de [5].*

2.3.2 Relation entre Sone et Phone

Pour être valable à toutes les fréquences, la loi de Stevens introduite plus haut doit être calculée avec les phones et un exposant qui varie. On se limitera ici à la bande de fréquence discutée ci-dessus, autour de 1000 Hz. On peut donc en bonne approximation utiliser le niveau en décibel D plutôt que les phones (égalité à 1000 Hz). L'intensité perçue S (unité : Sone) sera donc calculée à partir des dB et exprimée par la loi de Stevens ré-exprimée en fonction de D, voir [1].

$$S = 2^{\frac{D-40}{10}}. \quad (3)$$

Avec cette définition, un signal sonore de 40dB à 1000Hz vaut 1 Sone (voir carré noir de la Fig. 1). Le rapport d'intensité perçue entre deux puissances sonores exprimées par D_1 et D_2 en dB sera donc :

$$\frac{S_2}{S_1} = 2^{\frac{D}{10}} \quad \text{avec} \quad D = D_2 - D_1 \quad (4)$$

Les deux définitions de $\frac{S_2}{S_1}$, Eqs. 2 et 4 doivent donner le même résultat. L'inversion de l'Eq. 1 donne

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{D}{10}}. \quad (5)$$

Si l'on écrit

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\log_{10} 2} = \left(10^{D/10} \right)^{\log_{10} 2} = 10^{\frac{D}{10} \log_{10} 2}, \quad (6)$$

et donc finalement :

$$\frac{S_2}{S_1} = 2^{\frac{D}{10}}. \quad (7)$$

Les Eqs. 4 et 7 sont identiques, mais on utilise $\log_{10} 2 = 0.30103$ dans Eq.6, là où Eq. 2 utilise 0.3. Suivant les sources consultées, on peut être perturbé par ce petit décalage, rarement noté. Mais le facteur 0.3 de l'Eq. 2 est expérimental et il est moins précis que la différence des deux coefficients. Les auteurs choisissent donc les formules qui contiennent des chiffres ronds par commodité sans modifier sensiblement les résultats.

Finalement, on a les relations suivantes entre les trois variables P_1/P_1 , S_2/S_1 et $D = D_2 - D_1$:

$$\boxed{P_2/P_1 = 10^{D/10}} = (S_2/S_1)^{3.333} \quad (8)$$

$$\boxed{S_2/S_1 = 2^{D/10}} = (P_2/P_1)^{0.3} \quad (9)$$

$$D = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_2}{S_1 \log_{10} 2} \right) \quad (10)$$

Les valeurs numériques de la table sont calculées avec les relations encadrées.

2.3.3 Valeurs et repères numériques

Le niveau de 0dB correspond au seuil d'audition entre 2000 et 3000 Hz (carré vert de la Fig. 1). Lui correspond une puissance $P_{\text{ref}} = 10^{-12}$ Watt. Les décibels donnés en échelle verticale de la Fig. 2.3.2 sont calculés avec l'équ. 1 où $P_1 = P_{\text{ref}}$: $D = 10 \log_{10}(P/P_{\text{ref}})$. La variation de pression de l'air correspondante est $p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5}$ Pa (Pa : Pascal, unité de pression du système international SI). Cette pression doit être comparée à la pression atmosphérique $P_{\text{atm}} = 10^5$ Pa, qui est donc 5 milliard de fois plus élevée. Finalement l'amplitude d'oscillation du déplacement d'air vaut $\delta x_{\text{ref}} = 7.4 \times 10^{-12}$ m. Cette amplitude peut être comparée au diamètre de l'atome de carbone, 140×10^{-12} m, qui est donc 20 fois plus grande que δx . Notre oreille est sensible à un niveau difficile à imaginer concrètement.

3 Les émissions sonores du parc éolien de St-Brais

Deux machines éoliennes sont en opération sur une crête qui domine de 100 m le village de Saint-Brais. L'une (WEA1) est à 1000 m de distance du village, l'autre (WEA2) à 500 m. Cette dernière était partiellement bridée : pour réduire le bruit nocturne, l'orientation des pales était ajustée pour une vitesse de rotation limitée à 15 rotations par minute sur 18 possibles, limitant ainsi un peu la production électrique. Après installation des dentelures en 2017, le bridage a été supprimé. En reviendra sur ce point dans la discussion des résultats de l'étude acoustique réalisée durant cette période de changement. Cette étude a été réalisée par l'entreprise PRONA en 2017 sur mandat de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) en association avec la société ADEV, promotrice et exploitante du parc, et avec la Direction de l'Environnement du canton de Vaud (DGE). Le rapport de cette étude est disponible dans le site de l'OFEN, voir référence [6] dans la bibliographie.

3.1 Les résultats de l'étude PRONA

La lecture du rapport est un peu compliquée. Les auteurs ont dû composer avec des mesures faites durant deux courtes périodes de 25 jours, dont environ 12 jours réellement utiles dans chacune. Les mesures consistent à mesurer le niveau sonore à proximité de chacune des deux éoliennes, et en deux positions dans le village de St-Brais. La première période de mesure (période 1) est faite avant l'installation des dentelures (abrégée plus bas par TES, de l'anglais "trailing edge serrations", en français "dentelures de bord de fuite"). La deuxième période (période 2) est faite après l'installation des TES. La principale complication dans l'analyse des mesures sonométriques est due à l'usage d'un bridage nocturne (une limitation de vitesse de rotation de la machine WEA2 proche du village) qui limitait les émissions sonores par vent fort avant la période 2. Pour compliquer un peu plus l'analyse, la direction et la force vent différaient entre WEA1 et WEA2 pendant la période 1, alors que les conditions étaient presque identiques durant la période 2. Il faut apprécier positivement l'analyse faite qui a permis d'extraire de bons résultats. Nous résumons rapidement les résultats d'un rapport de 36 pages.

Les nuisances sonores sont manifestes pour des vitesses de vent supérieures à 7 m/s. La table ci-dessous donne la différence des niveaux de bruit mesurés à proximité de chaque machine avant et après l'installation des TES. Deux estimateurs sont extraits des figures des appendices A8 et A9 de [6], voir aussi p.14. On note une efficacité des TES d'au moins 3 dB pour WEA1, alors qu'elle semble être nulle ou légèrement négative pour WEA2. L'explication est donnée p.19 de [6] : une période spécifique de mesure de l'effet du bridage de WEA2 la nuit par vent fort montre qu'il offre une réduction moyenne de bruit de 3 dB.

Différence WEA1 - WEA2		
TES absents	TES présents	
WEA2 bridée	WEA2 non-bridée	
A8	+4 dB	-0,5 dB
A9	+3 dB	-0,5 dB

Il apparaît donc que l'effet des TES et celui du bridage sont pratiquement identiques : une réduction 3 dB de niveau de bruit par vent fort. Le remplacement du bridage par les TES ne change presque rien au niveau de WEA2.

L'efficacité observée des TES est compatible avec celle indiquée par le fabricant [7] p.19, environ 3 dB.

3.2 Incidence du changement pour les habitants du village de St-Brais

Les chiffres ci-dessus permettent d'évaluer le changement de niveau sonore dans le village de St-Brais après installation des TES, tout au moins par vent fort. Le niveau sonore éolien au village est la somme des contributions des deux machines. La machine WEA1 est deux fois plus éloignée que WEA2 (pour rappel : 1000 et 500m respectivement). La puissance sonore par unité de surface diminue avec le carré de la distance, aux effets de sol près. Donc, deux fois plus éloignée, WEA1 ajoute 1/4 de puissance sonore à celle de WEA2 à même puissance émise par les deux machines. Les mesures confirment ce chiffre, voir [6] p.30 Fig. A11, LUS NORD et LUS SUD. Les contribution mesurées de WEA1 et WEA2 en phase n°2 (quand les conditions de vent et l'équipement des machines sont identiques) montrent une différence proche de 6 dB et donc bien un facteur quatre en puissance, voir Sect. 2 Table 1.

Avec les TES, WEA1 émet 3dB en moins, donc une puissance sonore deux fois plus faible, voir Sect. 2 Table 1. Pour WEA2 rien ne change, puisque les TES compensent presque exactement la suppression du bridage. L'évolution relative du niveau sonore dans le village en terme de puissance est donc donnée par

$$\frac{P_{\text{apres}}}{P_{\text{avant}}} = \frac{P_{\text{WEA2}} + P_{\text{WEA1}}^{\text{TES}}}{P_{\text{WEA2}} + P_{\text{WEA1}}} = \frac{1 + 1/8}{1 + 1/4} = 0.9 \quad (11)$$

soit 10% de puissance sonore en moins. Converti en décibel avec l'Equ. 1 et, ce qui compte pour les habitants, **le rapport de niveau acoustique perçu** (Equ. 2), ce rapport de puissance de 10% donne

$$D_{\text{apres}} - D_{\text{avant}} = -0.5 \text{ dB} \quad \text{et} \quad \mathbf{S}_{\text{apres}}/\mathbf{S}_{\text{avant}} = \mathbf{0.97}. \quad (12)$$

Ce changement est faible, et même imperceptible. L'oreille humaine ne perçoit pas un changement de niveau sonore inférieur à 1 dB.

On peut donc conclure que pour les habitants de St-Brais, l'installation des TES conjointe à la suppression du bridage n'apportent pas de changement significatif. Il se peut que seul un changement de timbre du bruit soit perceptible.

On peut ajouter qu'en l'absence de bridage avant l'installation des TES, le gain au village aurait été de -3 dB. La diminution du signal sonore perçu aurait été de 19%, comme discuté dans la Sect. 2.

Dans un communiqué de presse [8] Suisse-Eole laisse croire à une réduction de nuisance sonore d'un facteur deux. Avec des dentelles, c'est vrai pour la puissance émise, mais pas pour le niveau sonore perçu qui n'est diminué que de 19%. Et ce n'est même pas le cas à St-Brais où les dentelles ont remplacé le bridage de l'éolienne la plus proche du village. Le bilan sonore pour les habitants est pratiquement nul, voir ci-dessus. Suisse-Eole produit donc de l'"infox" à deux niveaux, ce qui est préoccupant de la part d'une association subventionnée par le Confédération.

On relèvera en particulier [8] une comparaison avec le trafic routier : "La réduction moyenne du bruit est de 3 décibels. En comparaison avec le bruit du trafic routier il s'agit d'une diminution de la moitié du trafic". Ce qui laisse penser que "le bruit" à diminué de moitié à St-Brais. Ce qui est faux comme on l'a vu plus haut, puisque dans ce cas particulier les dentelles n'ont fait que remplacer le bridage sans amélioration sonore significative.

Reste le cas d'une diminution de moitié du trafic routier. On peut prendre deux exemples extrêmes.

- Une route lointaine à grand trafic. On entend un bruit à peu près continu. Deux fois moins de voitures diminuent la puissance sonore par deux, toujours continue. On est ramené au cas de l'ajout de dentelures : -19% de niveau sonore perçu.
- Un route très proche, trafic moyen, avec un temps de silence de quelques secondes entre deux passages de voitures. Si le trafic diminue, le temps de silence s'allonge, le bruit de chaque voiture reste le même. Si les passages de voitures perturbent le sommeil, le doublement du temps de silence entre voitures n'y changera rien. L'usage d'un facteur deux de réduction de nuisances n'a ici aucun sens. Suisse-Eole produit donc de l'"infox" à deux niveaux, ce qui est préoccupant de la part d'une association subventionnée par le Confédération.

Le seul gain de l'opération est la disparition du bridage qui augmente la production du parc. Mais c'est au bénéfice de l'exploitant, et non pas des habitants comme ses dirigeants et Suisse-Eole le laissent croire.

Références

- [1] <http://www.cochlea.eu/son/psychoacoustique>
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Stevens
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sone>
- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Phone_\(acoustique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phone_(acoustique))
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>
- [6] X. Falourd et L. Rohr, PRONA SA, Efficacité des Trailing Edge Serration (TES), Mesurage de l'efficacité acoustique de dentelures de bord de fuite (TES) sur les éoliennes à St-Brais.
<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=40722&Sprache=fr-CH>
<https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=46800&Load=true>
- [7] https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/windblatt/pdf/en/WB_022015_GB_150dpi.pdf
- [8] www.suisse-eole.ch/media/ul/resources/CP_St_Brais_médias_sfZO3d3.pdf
- [9] <http://www.canalalpha.ch/emissions/eureka/eureka-contre-vents-et-marees-les-eoliennes-tournent-mais-pianissimo/>

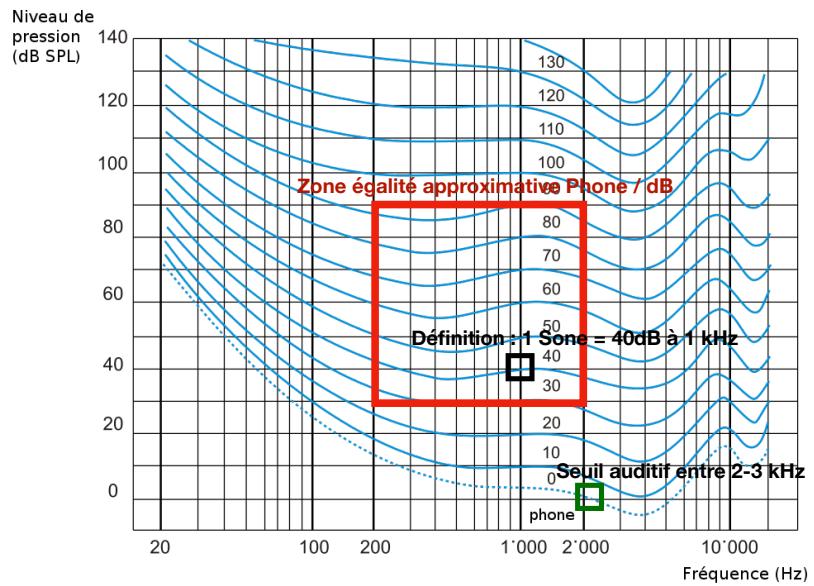


FIGURE 1 – Courbes isosoniques en fonction de la fréquence sonore donnée en oscillations par seconde (Hertz : Hz, échelle horizontale). Échelle verticale : niveau de pression sonore en décibels (dB SPL), Le carré rouge donne la zone d'intérêt pratique pour le voisinage d'un parc éolien.

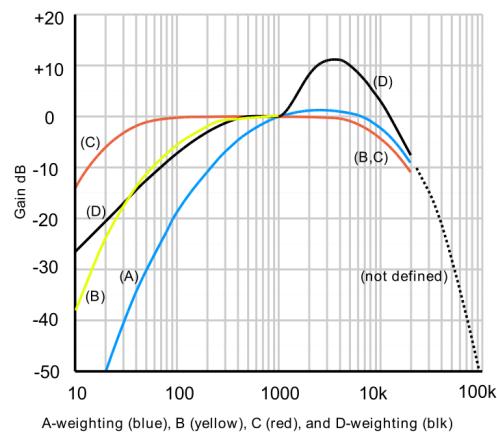


FIGURE 2 – Courbes de réponse utilisées en sonométrie. Un filtre qui suit la courbe dBA est souvent utilisé en sonométrie, et en particulier pour mesurer le bruit émis par des installations industrielles ou éoliennes. Le solide filtrage des basses fréquences justifie encore un peu plus le remplacement Phone / dB dans le calcul des Sones discuté dans le texte.