



## **Etude psychoacoustique des fluctuations et turbulences dans le bruit aérodynamique automobile**

G. Lemaitre<sup>a</sup>, C. Vartanian<sup>b</sup>, C. Lambourg<sup>a</sup> et P. Boussard<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Genesis Acoustics, Domaine du petit Arbois, 13045 Aix En Provence, France

<sup>b</sup>GIE-S2A, 2 Avenue Volta, 78390 Montigny-Le-Bretonneux, France  
guillaumejlemaitre@gmail.com

Le bruit aérodynamique est l'une des sources de bruit les plus importantes perçues par les passagers d'un véhicule pour des vitesses de véhicule élevées. Il est constitué d'une partie stationnaire, et de fluctuations générées en particulier par l'interaction avec la traînée d'autres véhicules à proximité. Cet article étudie l'influence de ce dernier phénomène sur la qualité sonore du véhicule. Des enregistrements binauraux de dix-neuf voitures ont été réalisés dans la soufflerie S2A à Montigny-le-Bretonneux à l'aide d'un module spécifique, simulant la présence d'un obstacle dans le flux d'air (p. ex. un autre véhicule), et générant des degrés de turbulences plus ou moins sévères. Des auditeurs naïfs et experts ont d'abord jugé le caractère désagréable de ces sons, à leur niveau acoustique réel. Le désagrément était dans ce cas lié en très grande partie à la sonie des sons. Les participants ont ensuite jugé les sons égalisés en sonie afin de mettre en lumière des effets plus subtils. Dans ce cas, le caractère désagréable était largement influencé par le module de turbulence et lié en grande partie à la force de fluctuation, un descripteur des modulations d'amplitude perçues. Nous proposons un indicateur du caractère désagréable des bruits aérodynamiques automobiles.

## 1 Introduction

Le bruit aérodynamique causé par un véhicule se déplaçant rapidement est la source de bruit la plus importante pour des vitesses supérieures à 120 km/h. C'est donc un enjeu important pour les constructeurs que de concevoir des designs de véhicule qui minimisent ce bruit. Le bruit aérodynamique est le plus souvent mesuré en plaçant un véhicule dans une soufflerie. Cependant, cette procédure ne permet pas de tenir compte de plusieurs phénomènes importants pour le confort acoustique : les bourrasques de vent et les fluctuations du bruit aérodynamique causées par la présence d'autres véhicules en mouvement ou statiques. Ces fluctuations d'amplitude contribuent grandement au désagrément des passagers [1, 2]. De manière générale, la présence de fluctuations d'amplitude dans un bruit est très souvent ressentie comme désagréable pour un grand nombre d'applications [3, 4, 5, 6].

La question se pose également de savoir comment évaluer ce type de bruit. Beaucoup d'indicateurs proposés dans la littérature sont en fait basés sur des mesures d'intensité ou de sonie [7, 8]. Par définition, ces indicateurs ne peuvent pas capturer l'aspect plus ou moins fluctuant du bruit. Pour mesurer cet aspect, Blommer et al. (2003) ont développé un indicateur basé sur la détection de transitoires et mesurant la sonie de ces transitoires [9]. Le problème est que la détection automatique des transitoires est loin d'être triviale et que le modèle de sonie normalisé n'est pas adapté aux sons impulsifs.

Il existe de nombreuses études psychoacoustiques de bruits ou de sons purs modulés en amplitude [10, 11, 12, 13]. Lorsque les modulations sont rapides ( $> 20$  Hz), les sons sont perçus comme rugueux, lorsqu'elles sont plus lentes les auditeurs perçoivent distinctement des fluctuations de la sonie. La sensation liée à la perception des fluctuations lentes est appelée "force de fluctuation". La force de fluctuation pour un son pur modulé sinusoïdalement en amplitude est maximale pour une fréquence de modulation aux alentours de 4 Hz, et augmente avec l'amplitude du signal et la profondeur de modulation. Zwicker and Fastl ont proposé une unité pour la force de fluctuation : le "vacil" [13]. Ils ont proposé un indicateur pour cette sensation basé sur le calcul d'un index de modulation calculé sur l'enveloppe du signal, tenant compte du masquage temporel. Cet indicateur fonctionne bien pour les sons purs modulés en amplitude, mais pas pour les bruits large-bandes. En effet, par définition, ces bruits possèdent des fluctuations aléatoires, notamment de l'ordre de quelques Hz considérées à tort par le modèle comme contribuant à la force de fluctuation. Or, de tels

sons sont bien perçus comme stationnaires. Un modèle plus complexe a été proposé par Sontacchi (1999) [14], qui est en fait une transposition des modèles d'Aures (1985) and Daniel and Weber (1997) développés pour la rugosité [15, 16, 17, 18]. Ces modèles ont la particularité de décomposer le signal en différentes bandes fréquentielles, et de comparer les fluctuations dans toutes les bandes. Quand les fluctuations sont synchronisées, elles contribuent à la force de fluctuation.

Le but de l'étude rapportée ici était d'étudier la perception des fluctuations du bruit aérodynamique et de développer un indicateur du désagrément causé par ces sons. Des sons ont été enregistrés en plaçant différents véhicules dans une soufflerie munie d'un dispositif spécifique permettant de simuler la présence d'un autre véhicule proche du véhicule testé (appelé ici le "module" acoustique). Deux expériences ont été menées au cours desquelles les sujets jugeaient du caractère désagréable des sons. Dans la première, les sons étaient joués à sonie réelle. Dans la seconde, les sons étaient joués à sonie égalisée. En effet, lorsque des sons sont joués avec de grandes différences de sonie, les jugements de désagrément sont généralement très fortement liés aux variations de sonie, qui écrasent l'effet d'autres caractéristiques acoustiques plus subtiles. D'autre part, comme la force de fluctuation augmente avec la sonie [10, 11, 13], il est difficile de démêler l'influence de ces deux aspects si les sons varient en sonie.

## 2 Etude expérimentale

### 2.1 Enregistrements

Dix-neuf véhicules ont été enregistrés dans la soufflerie GIE-S2A à Montigny-le-Bretonneux au moyen d'une tête artificielle Head Acoustics (position conducteur) et d'un système d'acquisition Head Acoustics, à une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz (voir la Figure 1). Trois positions du module acoustique ont été utilisées : position "parking" (le module ne produit pas de fluctuation), position "référence" (la position qui produit le maximum de turbulence) et position "centre" (le module est centré sur l'axe du véhicule testé). Le corpus de test était donc constitué au total de 57 sons (19 x 3). Les sons ont été enregistrés pour une vitesse d'écoulement correspond à un véhicule roulant à 120 km/h.

Les sons étaient d'une durée de 10 s. Pour l'expérience à sonie égalisée, les sons étaient diffusés à 81 phones (modèle de Zwicker ISO 532 B [19]). Pour l'expérience à sonie réelle, la sonie des sons variait de 78 à 91 phones. Le dispositif était

calibré de manière à reproduire ces niveaux de manière fidèle à ce qui avait été enregistré dans les voitures.

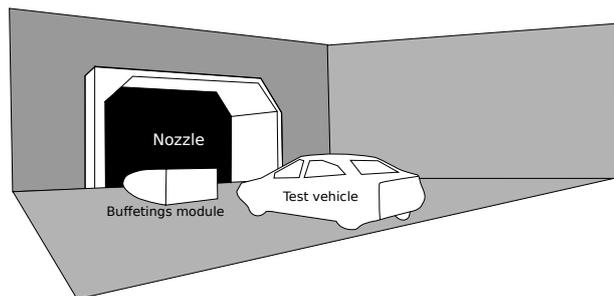


FIGURE 1 – Le véhicule et le module de turbulence dans la soufflerie.

## 2.2 Méthode

### 2.2.1 Stimuli et dispositif expérimental

L'interface de l'expérience était programmée en Matlab à l'aide de la toolbox Psychophysics Toolbox [20]. Les fichiers sons étaient convertis et amplifiés par une carte son RME Fireface 400 et joués au moyen d'un casque ouvert Sennheiser HD650 et d'un caisson de basse Cabasse TSA 100W. La fréquence de crossover entre le casque et le caisson était fixée à 60 Hz. La position du caisson de basses a été déterminée empiriquement de manière à obtenir une réponse plate en basses fréquences aux deux oreilles des sujets. Au préalable, la réponse fréquentielle des micros et du mannequin ayant servi aux mesures a été mesurée, ainsi que celle du casque d'écoute. Tous les stimuli ont alors été filtrés par un filtre permettant de compenser globalement la réponse du mannequin et du casque.

### 2.2.2 Participants

Deux groupes de participants ont participé à l'expérience : 30 participants naïfs recrutés par GENESIS, et 18 participants experts (personnel de S2A ou clients constructeurs automobiles).

Le groupe naïf était constitué de 15 hommes et 15 femmes, dans une tranche d'âges allant de 20 à 60 ans (médiane 40 ans). Les participants naïfs étaient recrutés sur la base d'un questionnaire. Seuls les participants possédant une expertise nulle ou minimale dans les domaines de la musique et du son et possédant une voiture étaient recrutés. Les sujets étaient rétribués par des bons d'achat de 40 Euros.

Le groupe expert était constitué de 17 hommes et d'une femme, avec une tranche d'âges allant de 25 à 57 ans (médiane 45 ans).

### 2.2.3 Procédure

La procédure utilisée pour cette expérience était adaptée de la méthode MUSHRA développée pour l'évaluation des codecs audio [21]. Le principe de cette méthode est de présenter à chaque étape de l'expérience une série de stimuli que les participants doivent juger (comparer, voir la Figure 2). Sans que les participants en soient informés, deux stimuli de référence sont systématiquement présents : le stimulus a priori le plus désagréable, et le stimulus a priori le moins

désagréable. L'avantage de cette méthode est que les sujets peuvent comparer les sons entre eux, et en particulier aux deux références. Les jugements obtenus forment donc une échelle d'intervalles dont les deux bornes sont fixées par les sons de référence.

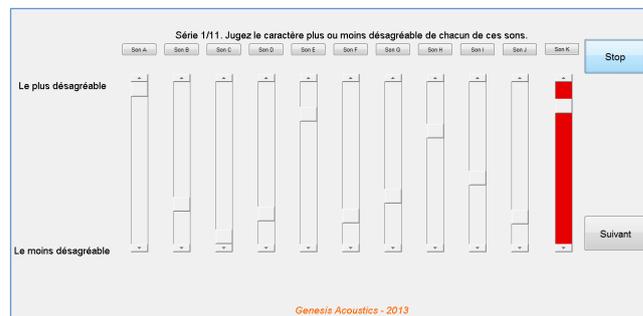


FIGURE 2 – Interface de test.

Chaque expérience consistait en une série de 11 écrans. Sur chaque écran, 11 échelles étaient représentées, étiquetées de "le moins désagréable" à "le plus désagréable". Onze boutons permettaient d'écouter les onze sons présentés. Les participants pouvaient écouter les sons autant de fois qu'ils le souhaitaient, mais devaient écouter chaque son au moins une fois (une sécurité empêchait de passer à l'étape suivante si tous les sons n'avaient pas été écoutés). La consigne spécifiait que les participants devaient "trouver le son le plus et le moins désagréable" pour chaque interface. Une sécurité empêchait les sujets de passer à l'étape suivante si au moins un son n'avait pas été jugé au désagrément maximal, et un son au désagrément minimal.

Les sons de référence avaient été choisis à l'issue d'expériences préliminaires.

## 3 Résultats à sonie réelle

Pour chaque son et chaque sujet, le jugement donné par le sujet est codé entre 0 (désagrément minimal) et 1 (désagrément maximal).

L'examen approfondi des données individuelles (non détaillé ici) a écarté quatre sujets dont les résultats semblaient douteux.

### 3.1 Influence des facteurs expérimentaux

En préalable aux analyses globales, les résultats pour chaque son ont été moyennés à travers les différentes répétitions. Ces résultats sont représentés sur la partie supérieure de la Figure 3.

Ces résultats ont été analysés aux moyens d'analyses de la variance (ANOVA). L'analyse a été réalisée en considérant trois variables indépendantes : les 19 voitures, les trois positions du module (variables intra-individuelles) et les deux groupes de sujet (naïfs et experts, variable inter-individuelle). La variable dépendante est le jugement moyen pour chaque sujet et chaque son. Toutes les statistiques rapportées ici le sont après avoir appliqué une correction de Geisser-Greenhouse (pour s'assurer que le test est valide malgré un éventuel non-respect des conditions d'application du test : la sphéricité des données). L'ANOVA permet d'abord d'analyser l'effet

principal de chaque variable indépendante. L'effet des groupes de sujets n'est pas significatif ( $F(1,41)=0.028$ ,  $p=0.869$ ,  $\eta^2=0.0$  %). L'effet des différentes voitures est significatif ( $F(18,738)=191.191$ ,  $p<.010$ ) et est l'effet le plus important en taille ( $\eta^2=49.4$  %). L'effet du module est également significatif ( $F(2,82)=121.887$ ,  $p<.010$ ,  $\eta^2=9.0$  %). On observe sur la Figure 3 que le désagrément pour les sons parking est jugé moins important que pour les sons référence. Une analyse des contrastes confirme que cette différence est significative ( $F(1,41)=39.645$ ,  $p<.010$ ).

### 3.2 Objectivation

La phase d'objectivation consiste à chercher un modèle prédictif des jugements de désagrément, calculé à partir de descripteurs acoustiques. La méthode utilisée a consisté dans un premier temps à calculer un ensemble de descripteurs acoustiques, puis à calculer un modèle de régression linéaire entre les sujets et les descripteurs acoustiques. Pour les sons à sonie réelle, les écoutes et les tests préalables ont fortement suggéré que les jugements de désagrément étaient basés sur des sensations liées à l'intensité du signal. Les descripteurs ont été calculés à l'aide de différentes bibliothèques de descripteurs, dont LEA de Genesis<sup>1</sup>, la toolbox sonie de Genesis<sup>2</sup> et nouvelle implémentation de l'algorithme de Daniel et Weber pour la rugosité [16] et de Sontacchi pour la force de fluctuation [14]. Au total, 274 descripteurs ont été testés. La première étape a consisté à calculer, pour chaque bibliothèque, les descripteurs les mieux corrélés aux jugements moyens des sujets.

L'indicateur de sonie est le mieux corrélé aux jugements de désagrément ( $r(55)=0.92$ ,  $p<.01$ , voir la partie gauche de la Figure 4). Afin d'améliorer l'objectivation, nous avons cherché dans une deuxième étape un modèle faisant intervenir une combinaison linéaire de plusieurs descripteurs pour la qualité de la prédiction. A cette fin, nous avons utilisé un algorithme de régression "stepwise". Cet algorithme a été couplé à une procédure de "bootstrap" : l'algorithme a été exécuté un très grand nombre de fois en changeant à chaque fois les conditions initiales. Ce procédé a permis de lister toutes les solutions atteignant une qualité de prédiction équivalente. Parmi ces solutions équivalentes, nous rapportons ici une solution qui a le mérite d'être cohérente avec les commentaires des sujets. Cette solution fait intervenir la sonie ISO 532 B, la sonie  $N_{10}$ , et la force de fluctuation dans la bande [5216-6360 Hz]. La qualité de prédiction de ce modèle est légèrement supérieure au modèle utilisant simplement la sonie ( $r(55)=0.96$ ,  $p<.0.1$ ). Il est représenté sur la partie droite de la Figure 4.

### 3.3 Discussion

Malgré la présence de sujets singuliers, la comparaison des sujets experts et naïfs ne laisse apercevoir qu'une très légère différence entre ces deux groupes.

Concernant l'influence du module, les résultats montrent que les sons enregistrés avec le module en position référence sont jugés plus désagréables que ceux en position parking. La position centre du module produit des sons notablement

moins désagréables. Dans cette position, le module est juste en face de la voiture testée, et diminue grandement l'intensité globale du bruit aérodynamique.

Concernant les différentes voitures, les analyses montrent que l'effet du module (en terme de désagrément), n'est clairement pas le même en fonction des différentes carrosseries. Pour la plupart des voitures, le module a pour effet d'augmenter le désagrément. Pour certaines cependant, le module n'a pas d'influence sur le désagrément.

Finalement, la phase d'objectivation montre que tous ces résultats s'expliquent principalement par les différences de sonie entre les sons. La Figure 4 montre cependant que, pour les sons les plus faibles, la sonie n'explique pas tout. L'analyse des résultats à sonie égalisée va donc permettre d'explorer les autres sensations qui peuvent intervenir dans les jugements de désagrément.

## 4 Résultats à sonie égalisée

Les mêmes étapes d'analyse ont été réalisées que pour l'expérience avec les sons à sonie réelle. Un examen approfondi des résultats individuels a permis d'exclure cinq participants.

### 4.1 Influence des facteurs expérimentaux

En préalable aux analyses globales, les résultats pour chaque son ont été moyennés à travers les différentes répétitions. Ces résultats sont représentés sur la partie supérieure de la Figure 5.

La partie haute de la figure montre que les jugements pour les positions référence et centre sont le plus souvent très similaires entre eux, et notablement différents des sons en position parking. La différence entre les positions référence et centre (avec module) et parking (sans module) est d'autant plus grande que le jugement en position parking est faible (moins désagréable). Le module a donc moins d'influence quand le son sans module est déjà jugé désagréable. Ces observations ont été analysées de manière systématique à l'aide d'une ANOVA similaire à celle réalisée pour l'expérience à sonie réelle.

L'effet principal des différentes voitures est significatif ( $F(18,738)=28.590$ ,  $p<.010$ ,  $\eta^2=13.2$  %), ainsi que celui du module ( $F(2,82)=245.359$ ,  $p<.010$ ), qui est également l'effet le plus important en taille ( $\eta^2=27.2$  %). L'effet principal des groupes de sujets n'est lui pas significatif ( $F(1,41)=3.262$ ,  $p=0.078$ ). La seule interaction significative est celle entre les trois variables ( $F(36,1476)=1.746$ ,  $p<.05$ ). Cependant, cet effet est d'une taille beaucoup plus faible que ceux des autres variables ( $\eta^2=0.9$  %), et ne sera pas discuté plus en avant.

Les résultats sont donc ici plus simples que pour les sons à sonie réelle : les différentes voitures produisent des sons jugés globalement significativement différents les uns des autres. De la même manière, le module en position référence ou centre produit des sons jugés plus désagréables que le module en position parking. L'analyse des contrastes montre que les jugements en position référence et centre ne sont pas significativement différents l'un de l'autre ( $F(1,41)=0.021$ ,  $p=0.885$ ). Il est également notable que la différence entre les deux groupes ne soit pas significative.

1. [http://www.genesis-acoustics.com/en/lea\\_the\\_sound\\_lab\\_for\\_industry-14.html](http://www.genesis-acoustics.com/en/lea_the_sound_lab_for_industry-14.html)

2. [http://www.genesis-acoustics.com/en/loudness\\_online-32.html](http://www.genesis-acoustics.com/en/loudness_online-32.html).

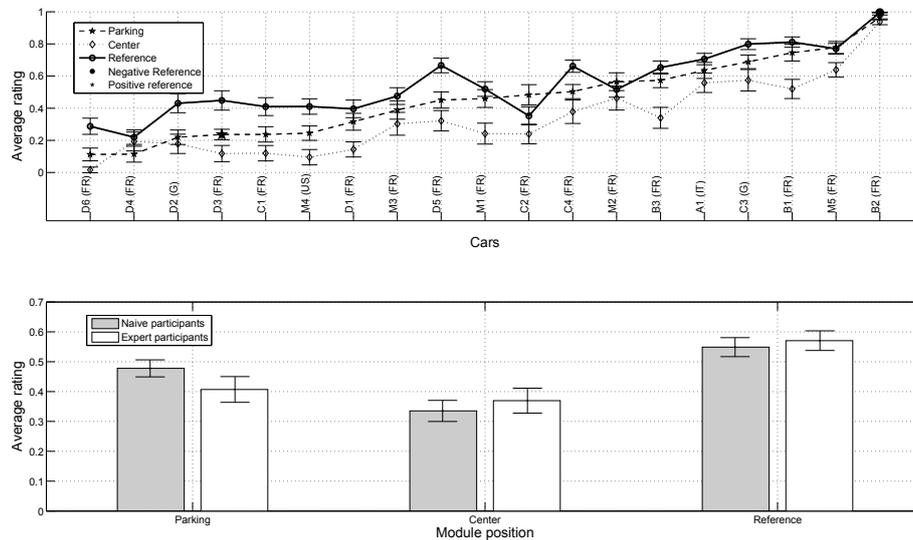


FIGURE 3 – Analyse des résultats à sonie réelle. En haut : résultats moyennés à travers les sujets pour les 19 voitures et les trois positions du module. En bas : résultats moyennés à travers les sujets pour les trois positions du module et les deux groupes de sujets. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

## 4.2 Objectivation

La même méthode d'objectivation que précédemment a été utilisée pour les sons à sonie égalisée. L'indicateur le mieux corrélé aux jugements de désagrément est la force de fluctuation dans la bande [5216-6360 Hz] ( $r(55)=0.79$ ,  $p<.01$ , voir la partie gauche de la Figure 6). Le meilleur modèle multilinéaire fait intervenir la force de fluctuation dans la bande [5216-6360 Hz], [3252-3903 Hz], l'acuité (DIN 45692), and le niveau en dB(A) :  $r(55)=0.91$ ,  $p<.01$ . Il est représenté sur la partie droite de la Figure 6.

## 5 Discussion générale

Cette étude s'intéressait aux sons produits uniquement par l'écoulement d'air sur la carrosserie d'une voiture, en présence d'un module simulant la présence d'un véhicule proche et générant des turbulences. Deux expériences ont consisté à demander à un ensemble de sujets (experts et sujets naïfs) de juger ces sons sur une échelle de désagrément, avec une interface permettant de comparer chaque son à deux références, correspondant à des sons a priori les plus et les moins désagréables.

L'analyse des résultats à sonie réelle montre principalement que les sujets ont jugé désagréables les sons les plus forts : les jugements de désagrément sont fortement corrélés à la sonie. Les résultats montrent également que dans ce cas l'effet du module sur le désagrément n'est pas le même pour toutes les voitures. Sachant que dans cette expérience les jugements de désagrément sont fortement corrélés à la sonie, on peut donc en déduire que le module va augmenter la sonie de manière différente en fonction des voitures.

De manière générale, la principale conclusion de l'expérience à sonie réelle est que différentes combinaisons de voiture et de module produisent des sons plus ou moins forts et que le désagrément est directement prédit par la sonie des sons. Il s'agit d'un résultat largement attendu. L'expérience à sonie égalisée permet d'aller plus loin et de mettre en lumière des effets plus subtils.

Les analyses montrent d'abord que les positions centre et

référence produisent des sons en moyenne plus désagréables que les sons en position parking. L'effet des turbulences produites par le module est donc ici prépondérant pour expliquer le désagrément ressenti par les auditeurs. L'analyse des corrélations montre précisément que le désagrément est lié à la force de fluctuation pour les modulations du son aux alentours de 4/5 kHz et à des aspects spectraux : les sons avec des modulations en hautes fréquences et un spectre avec beaucoup d'énergie en hautes fréquences sont jugés plus désagréables que les sons sans modulation (ou des modulations des seules basses fréquences) et un spectre plus sourd.

De manière générale, les deux expériences cumulées montrent que les sujets préfèrent des sons moins forts, avec un spectre sourd, et peu de modulations en hautes fréquences. Cette étude a permis de mettre au point modèle prédictif du désagrément quantifiant ces effets.

## Références

- [1] M. Bouden, G. Booz, R. Heinrichs, Interior vehicle sound composition : wind noise perception, in : Proceedings of the joint congress, Congrès Français d'Acoustique/Tagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik (CFA/DAGA), Strasbourg, France, Société Française d'Acoustique, Paris, France, 2004.
- [2] S. Amman, J. Greenberg, B. Gulker, S. Abhyankar, Subjective quantification of wind buffeting noise, in : Proceedings of the Noise and Vibration Conference and Exhibition, Traverse City, MI, Society of Automotive Engineers International, Warrendale, PA, 1999, SAE Technical paper series 1999-01-1821.
- [3] C. Kantarelis, J. G. Walker, The identification and subjective effect of amplitude modulation in diesel engine exhaust noise, Journal of Sound and Vibration 120 (2) (1988) 297–302.

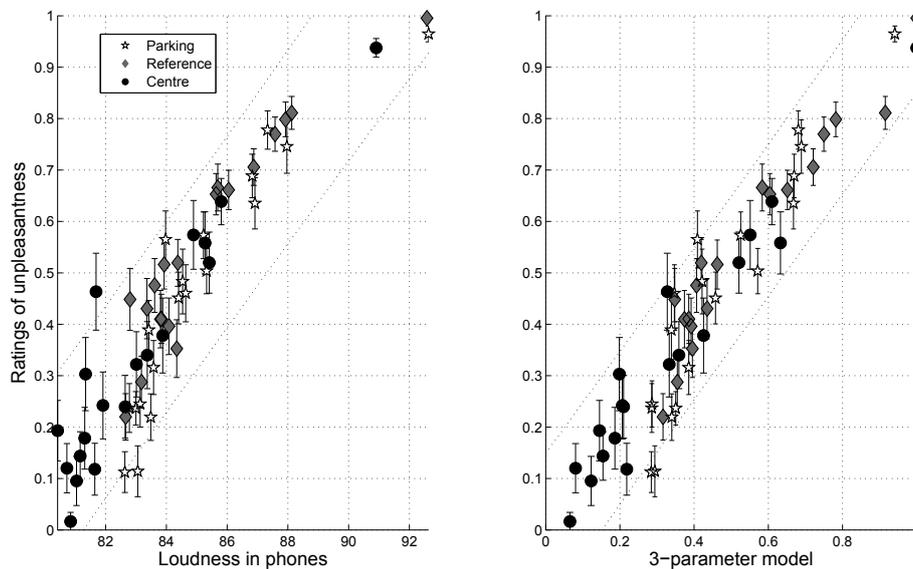


FIGURE 4 – Objectivation des jugements de désagrément pour l'expérience à sonie réelle. Partie gauche : modèle faisant intervenir uniquement la sonie. Partie droite : modèle à trois paramètres (voir texte). Les barres verticales représentent l'écart-type à travers les sujets.

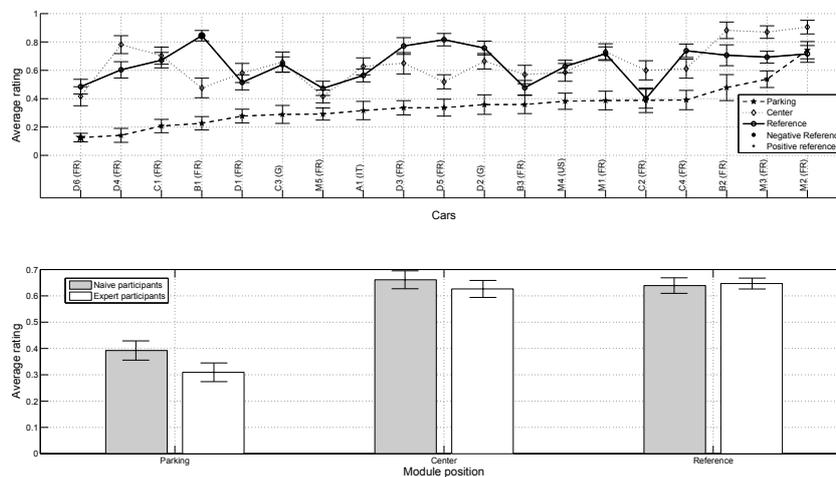


FIGURE 5 – Analyse des résultats à sonie égalisée. En haut : résultats moyennés à travers les sujets pour les 19 voitures et les trois positions du module. En bas : résultats moyennés à travers les sujets pour les trois positions du module et les deux groupes de sujets. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

- [4] J. S. Bradley, Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble, *Noise control engineering journal* 42 (6) (1994) 203–208.
- [5] R. Penna Leite, S. Paul, S. N. Y. Gerges, A sound quality-based investigation of the HVAC system noise of an automobile model, *Applied Acoustics* 70 (2009) 636–645.
- [6] K. P. Waye, E. Öhrström, Psychoacoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise, *Applied Acoustics* 250 (1) (2002) 65–73.
- [7] N. Otto, B. J. Feng, Wind noise sound quality, in : *Proceedings of the Noise and Vibration Conference*, Traverse City, MI, Society of Automotive Engineers International, Warrendale, PA, 1995, SAE Technical paper series 951369.
- [8] H. Hoshino, H. Kato, A new objective evaluation method of wind noise in a car based on human hearing properties, *Acosutical science and technology* 23 (1) (2002) 17–24.
- [9] M. Blommer, S. Amman, S. Abhyankar, B. Dedecker, Sound quality metric development for wind buffetting and gusting noise, in : *Proceedings of the Noise and Vibration Conference and Exhibition*, Traverse City, MI, Society of Automotive Engineers International, Warrendale, PA, 2003, SAE Technical paper series 2003-01-1509.
- [10] H. Fastl, Fluctuation strength and temporal masking patterns of amplitude-modulated broadband noise, *Hearing research* 8 (1982) 59–69.
- [11] H. Fastl, Fluctuation strength of modulated tones and broadband noise, in : *Hearing, Physiological bases and psychophysics. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International*

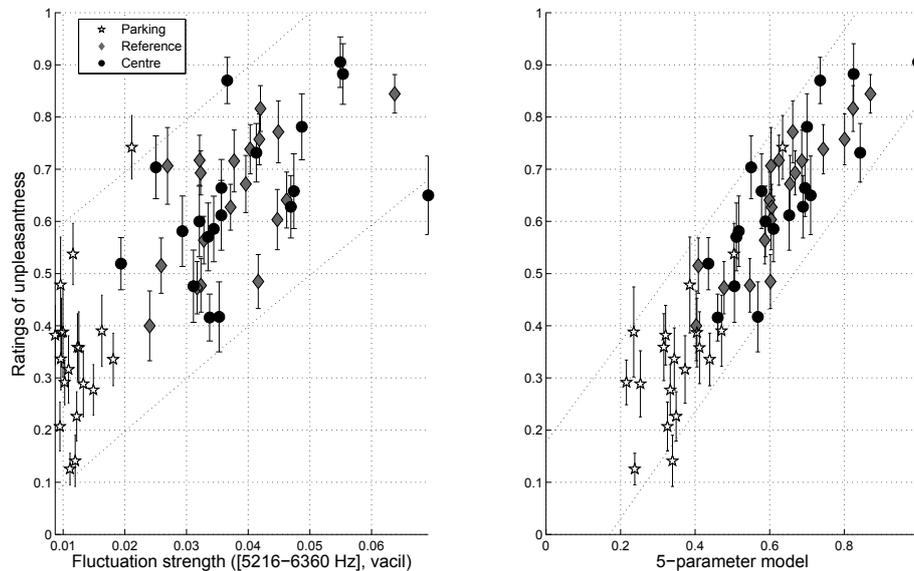


FIGURE 6 – Objectivation des jugements de désagrément pour l’expérience à sonie réelle. Partie gauche : modèle faisant intervenir uniquement la sonie. Partie droite : modèle à cinq paramètres (voir texte). Les barres verticales représentent l’intervalle de confiance à 95 % à travers les sujets.

Symposium on Hearing, Bad Neuheim, Germany, Springer Verlage, Heidelberg, 1983, pp. 282–288.

[12] H. Fleischer, Calculating psychoacoustic parameters of amplitude modulated narrow noise bands, *Biological cybernetics* 44 (1982) 177–184.

[13] E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics Facts and Models*, Springer Verlag, 1990.

[14] A. Sontacchi, Entwicklung eines modulkonzeptes für die psychoakustische geräuschenalyse unter matlab, diplomarbeit, Institut für Elektronische Musik der Kunstuniversität Graz, Graz, Austria (1999).

[15] W. Aures, Ein berechnungsverfahren des rauigkeit (a procedure for calculating auditory roughness), *Acustica* 58 (1985) 268–281.

[16] P. Daniel, R. Weber, Psychoacoustical roughness : implementation of an optimized model, *Acta Acustica united with Acustica* 83 (1997) 113–123.

[17] P. Daniel, Psychoacoustical roughness, in : D. Havelock, S. Kuwano, M. Vorländer (Eds.), *Handbook of signal processing in acoustics*, volume 1, 1st Edition, Springer, New York, 2008, Ch. 19, pp. 263–274.

[18] R. Hoeldrich, M. Pflueger, A generalized psychoacoustical model of modulation parameters (roughness) for objective vehicle noise quality evaluation, in : *Proceedings of the Noise and Vibration Conference and Exhibition*, Traverse City, MI, Society of Automotive Engineers International, Warrendale, PA, 1999, SAE Technical paper series 1999-01-1817.

[19] E. Zwicker, H. Fastl, U. Widmann, K. Kurakata, S. Kuwano, S. Namba, Program for calculating loudness according to DIN 45631 (ISO 532B), *Journal of the Acoustical Society of Japan* 12 (1).

[20] D. H. Brainard, The psychophysics toolbox, *Spatial Vision* 10 (1997) 433–436.

[21] Recommendation ITU-R BS.1534-1. Method for the subjective assessment of intermediate quality level of coding systems, international Telecom Union, Geneva, Switzerland (2001-2003).