

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Proposition d'un indicateur binaural d'acuité**

L. Laroche et A. Minard

GENESIS, Domaine du Petit Arbois, Bâtiment Gérard Mégie BP69, 13545 Aix-En-Provence, France  
luc.laroche@centrale-marseille.fr

Les travaux menés depuis de nombreuses années dans les domaines du timbre et de la qualité sonore ont permis de mettre au point différents indicateurs psychoacoustiques qui modélisent plusieurs percepts élémentaires. Pour la majorité d'entre eux, les algorithmes sont définis pour des signaux acoustiques constitués d'un seul canal (monophoniques). Une exception notable est la sonie, pour laquelle il existe une large littérature sur la prise en compte du caractère binaural des signaux dans les modèles de calcul. Peu d'éléments existent en revanche en ce qui concerne l'acuité, la rugosité, ou la tonalité. L'étude présentée ici s'inscrit dans le projet de généraliser la prise en compte de la nature binaurale de notre audition dans le calcul des indicateurs psychoacoustiques. Cette étude se concentre sur le cas de l'acuité. Ainsi, deux expériences ont été mises au point afin de mieux comprendre la perception binaurale de l'acuité, et d'en obtenir un indicateur représentatif. La première expérience tente de déterminer si, pour des sons stationnaires, la cohérence de phase entre les 2 oreilles a un impact sur l'acuité perçue. La seconde expérience a pour but de quantifier les variations d'acuité produites par un signal binaural par rapport aux deux signaux monophoniques correspondant aux 2 oreilles, pour différents types de sources sonores. Enfin, différentes approches de calcul de l'acuité binaurale sont proposées, aboutissant à plusieurs indicateurs binauraux possibles pour ce percept. Les résultats des expériences réalisées ont alors été confrontés aux indicateurs introduits afin d'identifier la meilleure approche pour intégrer l'acuité aux 2 oreilles.

## 1 Introduction

L'étude du timbre et de la qualité sonore est un sujet auquel la recherche en psychoacoustique s'intéresse depuis de nombreuses années. Les travaux menés sur le sujet ont fait émerger une large variété d'indicateurs calculables sur le signal sonore, dans un premier temps en ce qui concerne le timbre musical [1,2,3]. Par la suite, les principes du timbre ont été transposés aux sons de l'environnement, dans un souci d'étude de la qualité sonore [4,5,6]. Au final, les différents indicateurs mis au point répondent au besoin de quantifier certaines sensations auditives élémentaires : sonie, acuité, tonalité, etc.

Toutefois, dans leurs définitions, la plupart de ces indicateurs sont calculés à partir d'un simple signal sonore, souvent enregistré à l'aide d'un seul microphone. Or, la nature même de notre audition implique deux signaux captés par nos deux oreilles. Ainsi, l'usage de têtes artificielles pour l'enregistrement s'est largement développé dans le monde industriel, notamment dans un souci de reproduction fidèle de l'aspect spatial du son. En conséquence, les définitions d'indicateurs existantes ne permettent, au mieux, que de calculer deux valeurs, là où notre perception d'une propriété acoustique d'une seule source sonore implique une forme d'intégration des signaux aux 2 oreilles. Il importe donc d'évaluer dans quelle mesure et par quel moyen le calcul de chaque indicateur peut être combiné sur les signaux captés aux deux oreilles.

Une large littérature scientifique existe déjà pour le cas de la sonie binaurale. La sonie est l'indicateur psychoacoustique permettant de quantifier la sensation d'intensité sonore, et est associée à 2 normes internationales [7,8] (récemment intégrées au sein d'une seule et même norme [7]). En ce qui concerne la sonie binaurale, il est admis qu'un son présenté aux deux oreilles est perçu plus fort que lorsqu'il est présenté à une seule [9,10]. L'idée la plus simple est de considérer que la sonie binaurale est la somme de la sonie calculée à l'oreille droite et à l'oreille gauche. Ce modèle est utilisé pour une présentation diotique et fût adopté par la norme ANSI S-3.4 [8]. Ce modèle, dit « de sommation parfaite », a longtemps été utilisé. Plus récemment, des modèles dit de sommation « moins-que-parfaite » ont émergé. Ceux-ci reposent sur l'idée que les sonies perçues aux 2 oreilles ont une influence l'une sur l'autre, donc que la sonie binaurale n'est pas un modèle purement additif. Le modèle de sonie binaurale de Moore & Glasberg [11] repose sur l'idée que le son perçu à une oreille peut inhiber la perception de sonie à

l'autre oreille : à partir d'un enregistrement binaural, la sonie spécifique est calculée à chaque oreille selon la norme ANSI S-3.4 ; la sonie spécifique est ensuite lissée afin de calculer une fonction de pondération, inversement proportionnelle au rapport de sonie entre les deux signaux, reflétant le pouvoir « d'inhibition » d'une oreille sur l'autre. Ce modèle de sonie binaurale a été intégré lors de la révision de la norme ISO532 en 2017 [7].

Comme dans le modèle présenté précédemment, l'approche de Sivonen et Ellermeier [12,13] proposent un autre modèle de sommation « moins-que-parfaite ». Ici en revanche, la donnée d'entrée du modèle est le spectre du signal, mesuré à l'oreille gauche et droite. L'objectif de cette approche est de mettre en place un modèle compatible avec la norme ISO 532B [7], donc de se ramener à un enregistrement microphonique équivalent à partir d'un signal binaural. Afin de réaliser cette transformation, le modèle utilise une fonction de sommation de puissance, construite à partir des signaux d'entrée et d'un gain de sommation binaural  $g$ . La grandeur résultante de cette opération est une puissance équivalente, c'est-à-dire la puissance qu'il faudrait appliquer à chaque oreille pour avoir la même sensation de volume que lors d'une écoute binaurale. Enfin, le modèle de sonie monaurale de la norme ISO 532B est appliqué à ce signal équivalent afin d'obtenir l'indicateur de sonie binaurale. Ce modèle donne des résultats comparables au modèle de Moore et Glasberg. En revanche, il permet une meilleure prédiction lorsque la source est spatialisée. De plus, lorsque la différence entre les deux oreilles est grande, le modèle de Sivonen et Ellermeier semble également plus performant [13].

Les deux modèles de sonie binaurale présentés ci-dessus offrent des approches différentes dans le calcul de cet indicateur, que ce soit dans l'utilisation de la norme : ISO 532B ou ANSI S-3.4, ou dans le choix de la donnée d'entrée : spectre de puissance ou sonie spécifique. Ceci représente un bon point de départ pour l'étude et la mise au point de modèles binauraux pour d'autres indicateurs psychoacoustiques. Cette communication présente les résultats obtenus pour le cas de l'acuité. L'acuité est la sensation reflétant la répartition de l'énergie sonore sur le spectre fréquentiel. On décrira souvent un son de faible acuité comme « sourd/rond » alors qu'un son d'acuité importante sera « criard/brillant ». Le modèle d'indicateur le plus répandu est celui de Zwicker et Fastl [14]. Ce modèle repose sur un principe de centre de gravité de la sonie spécifique, avec une fonction de pondération, et un facteur de calibration de sorte à construire une échelle de

ratio de sensation, exprimée en acums. Plus simplement, le centre de gravité de la sonie spécifique (par la suite appelé Centre de Gravité Spectral ou CGS par souci de simplicité) est parfois utilisé sans la fonction de pondération et le facteur de calibration. La section 2 présente les modèles binauraux d'acuité proposés, dont certains transposent les principes des modèles de sonie binaurale. Les sections 3 et 4 présentent 2 expériences réalisées afin de confronter et comparer ces modèles avec des données expérimentales. Enfin la section 5 présente les principales conclusions tirées de ce travail.

## 2 Modèles binauraux d'acuité

Le modèle d'acuité de Zwicker & Fastl [14] ou sa version simplifiée de centre de gravité spectral (CGS) ne tiennent pas compte du caractère binaural d'un son. En effet, il n'est possible de calculer l'acuité que pour un enregistrement microphonique, donc un son monophonique. Il serait néanmoins intéressant de construire des modèles binauraux à partir de ces deux approches. De la même manière que les modèles de sonie [11,13] offrent deux approches, les modèles binauraux développés par la suite offrent deux approches de l'acuité, par le Centre de Gravité Spectral et le modèle de Zwicker et Fastl (Z&F dans la suite) [14].

### 2.1 Modèles simples

L'étude des modèles de sonie binaurale s'est tout d'abord intéressée aux modèles de sommation parfaite. Par analogie, une moyenne de l'acuité calculée aux deux oreilles pourrait constituer un premier modèle d'acuité. En effet, on imagine que si l'acuité du son présenté à l'oreille gauche est identique à celle présentée à l'oreille droite, la sensation d'acuité globale serait la même. En revanche, il est difficile de prédire la sensation d'acuité globale dans le cas où la Différence Interaurale d'Acuité (DIA) est grande. Nous avons donc considéré cette possibilité en construisant un modèle de moyenne simple à partir de l'acuité et du CGS.

Il est également possible de prendre en compte cette caractéristique en suivant la logique employée pour la sonie, c'est-à-dire en réalisant une sommation de sonie avant le calcul de l'acuité (analogie avec la sommation de puissance de Sivonen et Ellermeier), donnant ainsi lieu à deux nouveaux indicateurs.

Si l'idée que la sensation d'acuité, lors d'une écoute binaurale, peut être représentée par la moyenne des acuités aux deux oreilles semble cohérente, il est également possible que la sonie de ces deux sons ait un impact sur la sensation d'acuité binaurale. Ainsi, un son dont la sonie est plus forte à une oreille qu'à l'autre, aurait une plus grande influence sur la sensation d'acuité produite. Deux modèles fondés sur une moyenne des acuités pondérées par la sonie ont donc été construits afin de tenir compte de l'influence du volume sonore.

### 2.2 Modèles d'inhibitions

Le calcul d'acuité utilise celui de la sonie. Il est alors possible d'intégrer les principes de la sonie binaurale pour le calcul de l'acuité binaurale. En effet, à partir des modèles de sonie binaurale [11,13], il est possible d'intégrer la notion d'inhibition des oreilles l'une sur l'autre. Cependant, le modèle d'acuité de Zwicker et Fastl [14] est calculé à

partir de la norme ISO 532B, il ne semble donc pas cohérent d'intégrer la sonie binaurale de Moore et Glasberg (M&G par la suite) dans ce modèle car celle-ci est calculée à partir de la norme ANSI S-3,4. Ainsi le choix de construire des modèles d'inhibitions à partir de l'approche de Zwicker n'a pas été retenu, seule la construction de modèles à partir du CGS a été choisie.

L'ensemble des modèles proposés est résumé dans le Tableau 1.

Tableau 1: Récapitulatif des modèles construits

	Données d'entrée	Approches
Moyennes Simples	$S_G, S_D$	Z&F
	$CGS_G, CGS_D$	CGS
Moyennes Pondérées	$S_G, S_D, N_G, N_D$	Z&F
	$CGS_G, CGS_D, N_G, N_D$	CGS
Moyenne de la sonie spécifique (intégré au calcul de l'acuité)	$S_G, S_D, N_G', N_D'$	Z&F
	$CGS_G, CGS_D, N_G', N_D'$	CGS
Modèle d'inhibition (approche M&G)	$N_{M\&G}$	CGS
Modèle d'inhibition (approche S&E)	$N_{S\&E}$	CGS

L'ensemble des modèles présentés ci-dessus sont définis à partir du spectre d'amplitude du signal et ne tiennent donc pas compte du spectre de phase. S'il est admis que dans le cas de sons stationnaires et large bande, celui-ci n'a que peu ou pas d'importance, en revanche les différences de phase entre les 2 oreilles, et notamment la cohérence de phase, peuvent être perçues, donc potentiellement avoir une influence sur l'acuité. Nous avons donc défini une première expérience afin de déterminer si l'influence de la cohérence de phase pouvait être significative.

## 3 Expérience 1 : Influence de la cohérence de phase

L'idée majeure du test est de comparer, lors d'une écoute binaurale, l'influence de la cohérence de phase à celle d'une variation de la répartition fréquentielle de l'énergie.

### 3.1 Participants

Dix auditeurs (employés de Genesis) ont participé à cette expérience. Tous ont déjà réalisé au moins un test auditif et sont habitués aux expériences subjectives. Leur audition est normale et ils ne présentent pas de pathologie majeure d'audition.

### 3.2 Dispositif expérimental

L'expérience s'effectue par une écoute au casque (AKG K701-1) dans un environnement calme. La chaîne d'expérience est constituée d'un ordinateur connecté à une carte son RME, à laquelle est branché le casque d'écoute.

Sa calibration en niveau est effectuée à l'aide d'une tête artificielle Cortex MK2-B et d'un pistonphone 1 kHz 94 dB. La réponse du casque utilisé est compensée par un filtrage en tiers d'octave préalable à l'expérience.

### 3.3 Stimuli

Les sons utilisés pour l'expérience sont des resynthèses modifiées de sons stationnaires, correspondant à des enregistrements de 3 systèmes de climatisation automobile (SCA, voir Tableau 2). La méthode de resynthèse a pour but de générer différentes variations, en jouant sur la cohérence de phase et sur la répartition de l'énergie sur le spectre fréquentiel. Ceci permet de comparer l'effet de la cohérence de phase à une variation classique d'acuité liée à l'enveloppe du spectre d'amplitude, et, par ce biais, de l'exprimer sur l'échelle des acums.

Pour chaque signal binaural original, deux resynthèses dont les spectres d'amplitudes gauche et droit sont reconstruits, mais dont la cohérence de phase entre les deux canaux est modifiée, sont tout d'abord générées : phases aléatoires et identiques sur les canaux gauche et droite (« phase corrélée »), et phases aléatoires mais différentes sur les 2 canaux (« phase décorrélée »). Toutes les autres synthèses reproduisent le même spectre d'amplitude aux 2 oreilles. En revanche la phase est soit corrélée (recréant ainsi une écoute parfaitement diotique) soit décorrélée. Enfin des filtrages sont appliqués aux spectres d'amplitude, indépendamment de la phase. La liste des 14 synthèses ainsi créées est reportée dans le Tableau 2

Tableau 2: Liste de synthèses générées pour chaque enregistrement binaural.

	Spectres d'amplitude	Phase	Filtrage
Bin-Corr	G/D	Corrélée	-
Bin-Dec	G/D	Décorrélée	-
G-Corr	G/G	Corrélée	-
D-Corr	D/D	Corrélée	-
G-Dec	G/G	Décorrélée	-
D-Dec	D/D	Décorrélée	-
G-Corr-A	G/G	Corrélée	Filtre A
D-Corr-A	D/D	Corrélée	Filtre A
G-Dec-A	G/G	Décorrélée	Filtre A
D-Dec-A	D/D	Décorrélée	Filtre A
G-Corr-B	G/G	Corrélée	Filtre B
D-Corr-B	D/D	Corrélée	Filtre B
G-Dec-B	G/G	Décorrélée	Filtre B
D-Dec-B	D/D	Décorrélée	Filtre B

### 3.4 Procédure

L'expérience à proprement parler est précédée d'une phase d'apprentissage afin de familiariser si besoin les participants avec la notion d'acuité. L'expérience est ensuite menée avec une méthode dite d'évaluation comparée, où plusieurs sons sont présentés à l'écran simultanément, permettant ainsi aux participants de les évaluer par comparaisons progressives. Il est demandé aux participants d'évaluer l'acuité perçue pour chacun des sons sur une échelle de 0 à 100. La notation 0 représente le son « le moins brillant/ le plus sourd » et la note 100 le son « le plus brillant/ le moins sourd ». Les instructions imposaient qu'au moins un son sur chaque écran soit positionné à 0, et un autre, à 100.

Trois écrans contenant chacun 15 sons sont successivement présentés aux participants. Ces 15 sons correspondent à 1 des 3 enregistrements originaux, accompagnés de ses 14 resynthèses listées dans le Tableau 2. Il est à noter que les 3 enregistrements originaux (et leurs resynthèses respectives) ne sont pas comparés entre eux. Les échelles d'évaluations obtenues ne sont donc pas compatibles entre ces 3 groupes de sons.

### 3.5 Analyse des résultats

L'analyse individuelle ne révèle aucun outlier parmi le panel de participants. En guise d'exemple, la Figure 1 montre les évaluations moyennes de l'acuité pour 1 des 3 groupes de sons. L'enregistrement d'origine est en bleu à gauche, les points verts et rouges correspondent respectivement aux resynthèses à phase corrélée et à phase décorrélée. Cette figure permet de constater que l'effet de la cohérence de phase est de taille faible devant ceux des autres facteurs expérimentaux.

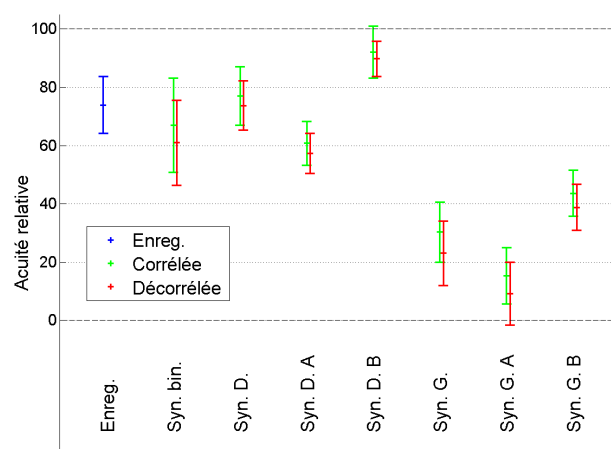


Figure 1: Evaluations moyennes et intervalles de confiance à 95% de l'acuité pour un groupe de son. « Syn. bin. » signifie synthèse binaurale (spectres d'amplitude gauche et droit) et « Syn. D. A » signifie synthèse avec le spectre d'amplitude droit et filtré par le filtre A.

Une ANOVA à mesures répétées et 3 facteurs (canal G/D, phase corrélée/décorrélée, filtrage A/B/aucun) a été appliquée et répétée sur les 3 groupes de sons formés par les 3 originaux et leurs resynthèses respectives. Seuls les effets principaux et les interactions de premier ordre sont inclus au modèle. Une correction de Bonferroni est utilisée pour compenser l'augmentation d'erreur de première espèce due à la répétition des tests. Cette ANOVA révèle des effets significatifs des facteurs canal G/D et filtrage, mais pas de la cohérence de phase, pour les 3 groupes de sons. Les interactions de premier ordre ne sont pas significatives, à la seule exception de l'interaction filtrage\*canal pour 1 des 3 groupes de sons.

Les filtrages utilisés produisent des variations d'acuité entre 14 et 26 points d'échelle de notation (variation de +/- 6 % selon le modèle de Zwicker & Fastl), tandis que les différences produites par la cohérence de phase se situent entre 2 et 5 points. Il est donc raisonnable de considérer l'effet de la cohérence de phase comme négligeable. Les modèles binauraux introduits en section 2, et uniquement fondés sur les spectres d'amplitude, semblent donc valides.

## 4 Expérience 2 : Objectivation de l'acuité binaurale

Cette expérience a pour objectif de quantifier la sensation d'acuité produite par un enregistrement binaural et de comparer les différents estimateurs présentés dans la section 2.

### 4.1 Participants

Pour ce test, deux types de participants ont été recrutés : 12 participants « experts » et 14 participants « naïfs ». La moyenne d'âge des participants est de 32 ans et aucun participant n'a mentionné de pathologie majeure d'audition.

### 4.2 Dispositif expérimental

Le même dispositif expérimental que lors de la première expérience a été utilisé. Celui-ci est décrit en section 3.2.

### 4.3 Stimuli

Les stimuli choisis sont des sons « écologiques » afin de représenter au mieux une situation réelle d'écoute. Ainsi trois environnements sonores ont été choisis :

- Sons de climatisation automobile (SCA)
- Sons de décollage d'avions
- Bruits aérodynamiques automobiles (en soufflerie).

Dans chacune des situations, 4 sons ont été sélectionnés, afin de reproduire une grande variété de configurations (valeurs de sonies et d'acuités différentes). Les valeurs d'acuité sont comprises entre 0.72 et 1.74 acums et les valeurs de sonie entre 64 et 84.2 phones.

En comparant la sensation produite dans cette situation avec celle produite lors d'une écoute diotique, pour laquelle il existe une valeur d'acuité et de CGS, il est possible d'encadrer la perception d'acuité. Le choix de présenter sur la même interface, 4 sons binauraux et 8 sons monophoniques (respectivement les canaux gauche et droit des stimuli de référence) a donc été fait.

### 4.4 Procédure

La procédure est globalement identique à celle utilisée pour la première expérience (évaluation comparée, voir section 3.4). Après une phase d'apprentissage, 3 écrans d'évaluation comparée de 12 sons, correspondant aux 3 types de sons mentionnés en section 4.3, ont été présentés aux participants.

### 4.5 Analyse des résultats

L'analyse des différences interindividuelles a révélé 3 participants (naïfs) dont les résultats divergeaient sensiblement des autres. Leurs résultats n'ont donc pas été pris en compte dans la suite. L'utilisation de sons diotiques permet de ramener toutes les évaluations sur l'échelle du modèle monophonique de Zwicker & Fastl, au travers d'une loi de passage obtenue par régression.

Les Figures 2, 3, et 4 présentent les résultats obtenus respectivement pour les 3 types de sources considérés. Ces figures permettent d'observer que dans la plupart des cas l'acuité binaurale se situe entre les 2 acuités diotiques. Seuls les sons d'avion et un son de SCA semble suivre une tendance différente. A ces exceptions près, le principe de moyenne d'acuité des 2 canaux semble judicieux.

Cependant, l'acuité binaurale apparaît dans certains cas plus proche de celle d'un des 2 canaux, laissant penser qu'une moyenne directe des 2 valeurs n'est pas la solution la plus précise.

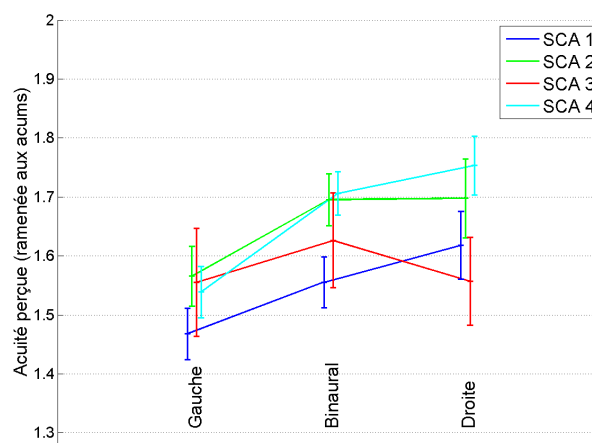


Figure 2: Evaluations moyennes et intervalles de confiance à 95% de l'acuité (ramenée à l'échelle des acums) pour les sons de systèmes de climatisation automobile (SCA).

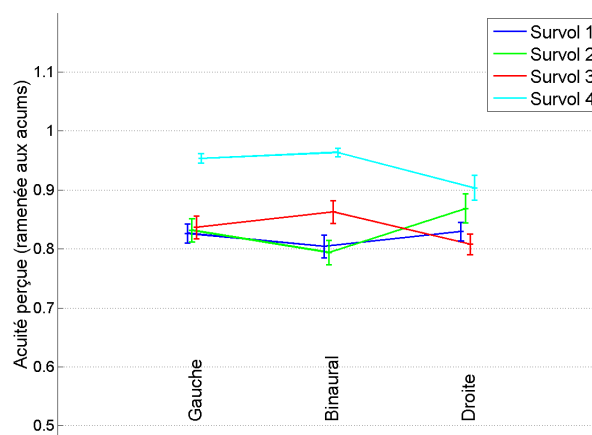


Figure 3: Evaluations moyennes et intervalles de confiance à 95% de l'acuité (ramenée à l'échelle des acums) pour les sons de survol d'avions.

Une ANOVA à mesures répétées et 2 facteurs (type : canal G, D ou son binaural ; et enregistrement d'origine) a été appliquée et répétée sur les 3 types de son. Seuls les effets principaux et les interactions de premier ordre sont inclus au modèle. Une correction de Bonferroni est utilisée pour compenser l'augmentation d'erreur de première espèce due à la répétition des tests. Cette ANOVA révèle des effets significatifs des 2 facteurs dans tous les cas, sauf le facteur type pour les sons de survols. Ces ANOVA révèlent également des interactions significatives entre ces deux facteurs pour les sons de SCA et de survol, où l'effet du caractère binaural du son semble donc dépendre de l'enregistrement d'origine.

Les modèles d'acuité binaurale présentés en section 2 ont été appliqués aux sons de cette expérience, afin de comparer leur efficacité à expliquer les valeurs mesurées. Le Tableau 3 résume les résultats de cette comparaison. A

titre d'exemples, les Figures 5 et 6 montrent la comparaison des résultats du test avec, respectivement, les modèles de CGS et les modèles d'acuité. Les différents modèles permettent une bonne évaluation de l'acuité perçue pour des sons dont les différences d'acuité et de sonie entre les deux canaux sont faibles, donc dans des cas se rapprochant d'une présentation diotique des sons. En revanche lorsque ces différences augmentent (supérieures à une variation de 16% de l'acuité, voir Tableau 3) les modèles de moyennes de l'acuité ne permettent plus une estimation fidèle de la perception d'acuité.

Il semblerait que les modèles de moyenne du Centre de Gravité Spectrale offrent une meilleure estimation de l'acuité, tant dans la précision de l'estimation que dans l'étendue des sons qu'ils permettent de comparer.

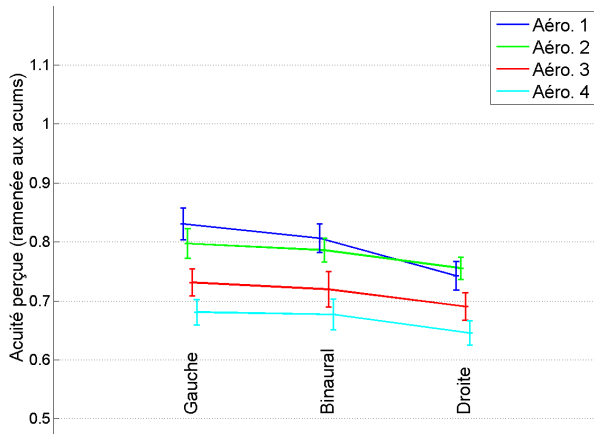


Figure 4: Evaluations moyennes et intervalles de confiance à 95% de l'acuité (ramenée à l'échelle des acums) pour les sons aérodynamiques d'intérieur de voiture (en soufflerie).

Tableau 3 : Synthèses des modèles d'acuité. Chaque variation est exprimée comme la différence des acuité/sonie entre les deux signaux, rapportée à l'acuité/sonie la plus forte.

Modèles	Variation d'acuité admissible entre les deux signaux (gauche et droit)	Variation de sonie admissible entre les deux signaux (gauche et droit)	Précision	Complexité du modèle
Moyenne de l'acuité	[5% ; 16%]	[0% ; 10%]	-	😊
Moyenne de l'acuité pondérée par la sonie	[5% ; 16%]	[0% ; 6%]	-	😊
Moyenne de la sonie spécifique (intégré au calcul de l'acuité)	[5% ; 16%]	[0% ; 10%]	--	😊
Moyenne CGS	[5% ; 33%]	[0% ; 10%]	++	😊
Moyenne du CGS pondéré par la sonie	[5% ; 33%]	[0% ; 10%]	++	😊
Moyenne de la sonie spécifique (intégré au CGS)	[5% ; 33%]	[0% ; 10%]	+	😊
Modèle d'inhibition 1	[5% ; 33%]	[0% ; 10%]	+ -	😐
Modèle d'inhibition 2	[5% ; 33%]	[0% ; 10%]	+	😞

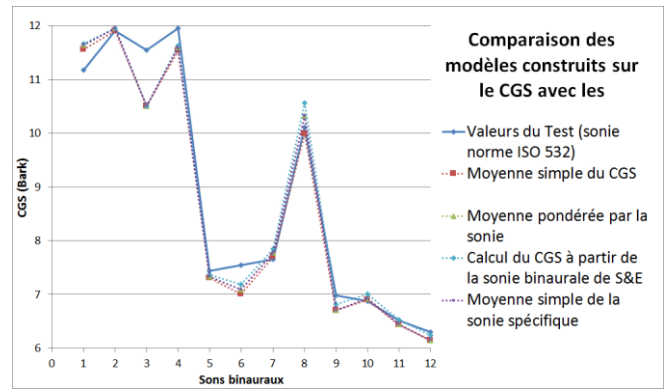


Figure 5: Comparaison des valeurs des modèles binauraux de CGS avec les valeurs mesurées au cours de l'expérience.

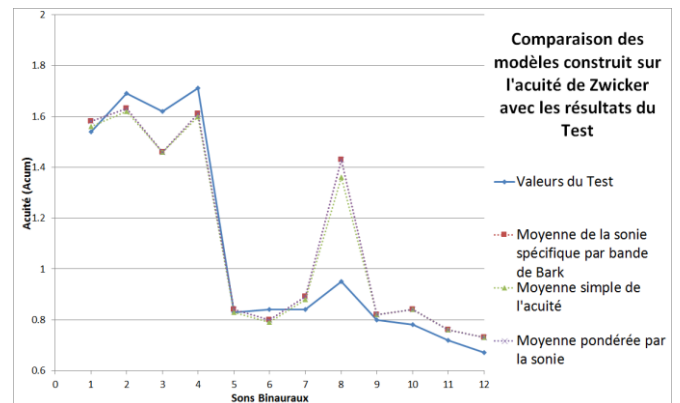


Figure 6: Comparaison des valeurs des modèles binauraux d'acuité avec les valeurs mesurées au cours de l'expérience.

## 5 Conclusion

La première expérience a montré que la cohérence de phase avait un effet négligeable sur la perception d'acuité lors d'une écoute binaurale, au moins en comparaison avec des variations du spectre d'amplitude.

La seconde expérience a permis d'évaluer avec précision l'acuité perçue, à partir des indicateurs calculés sur les signaux présentés aux deux oreilles. De plus, elle a permis la mise en évidence de deux approches, par l'acuité et le Centre de Gravité Spectrale, qui offrent des avantages différents : le choix d'une convention dans le calcul de la sonie et de l'acuité, différents degrés de complexité mais également la possibilité d'évaluer des sons dont les variations d'acuité et de sonie sont grandes.

Toutefois, les résultats de la seconde expérience réalisée ici souffre d'un nombre encore assez faible de stimuli pour être considérés comme entièrement concluants. De plus, uniquement des sons stationnaires ou lentement variables ont été considérés, pour limiter la variété des facteurs pouvant avoir une influence, et se concentrer sur les modèles globaux (i.e. non-instantanés) d'acuité. Ce travail devrait être élargi à l'avenir sur un plus grand nombre de sons et surtout sur une plus large variété de typologies sonores, l'acuité étant un percept important pour n'importe quelle catégorie de son.

Par ailleurs, à notre connaissance, aucun modèle binaural n'existe pour la rugosité, la tonalité et la force de

fluctuation. Or ces percepts peuvent aussi être importants pour décrire la perception, au moins pour certaines catégories de sons. Il semble donc nécessaire de mener également des travaux comparables pour ces indicateurs.

## Références

- [1] J. M. Grey. Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61(5) :1270–1277, 1977
- [2] C. L. Krumhansl. Structure and perception of electroacoustic sound and music, chapter Why is musical timbre so hard to understand ?, pages 43–53. Elsevier (Excerpta Medica 846), Amsterdam, The Netherlands, 1989.
- [3] S. McAdams, S. Winsberg, S. Donnadiou, G. De Soete, and J. Krimphoff. Perceptual scaling of synthesized musical timbres : Common dimensions, specificities, and latent subject classes. *Psychological Research*, 58 :177–192, 1995.
- [4] P. Susini, S. McAdams, and S. Winsberg. A multidimensional technique for sound quality assessment. *Acta Acustica united with Acustica*, 85(5) :650–656, 1999.
- [5] P. Susini, S. McAdams, S. Winsberg, I. Perry, S. Vieillard, and X. Rodet. Characterizing the sound quality of air conditioning noise. *Applied Acoustics*, 65(8) :763–790, 2004.
- [6] G. Lemaitre, P. Susini, S. Winsberg, S. McAdams, and B. Letinturier. The sound quality of car horns : A psychoacoustical study of timbre. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(3) :457–468, 2007.
- [7] ISO 532: Acoustics – Method for calculating loudness level, 1975. Revised in 2017.
- [8] ANSI S 3.4, Procedure for the computation of loudness of steady sounds, Melville, NY, USA, 2007.
- [9] Fletcher, H., and Munson, W. A. \_1933\_. “Loudness, its definition, measurement and calculation,” *J. Acoust. Soc. Am.* 5, 82–108.
- [10] Reynolds, G. S., and Stevens, S. S. \_1960\_. “Binaural summation of loudness,” *J. Acoust. Soc. Am.* 32, 1337–1344.
- [11] Moore, B. and Glasberg, B. (2007). Modeling binaural loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3), pp.1604-1612.
- [12] Sivonen, V. and Ellermeier, W. (2006). Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5), pp.2965-2980.
- [13] Sivonen, V. and Ellermeier, W. (2008). Binaural Loudness for Artificial-Head Measurements in Directional Sound Fields. *Journal of the Audio Engineering Society*, 56, pp.452–461.
- [14] Fastl, H. and Zwicker, E. (2005). *Psychoacoustics*. Berlin [etc.]: Springer, pp.239-243.