

Sonie d'un champ acoustique multi-tonal, composé d'une source bitonale ou de deux sources tonales simultanées

M. Vannier et E. Parizet

LVA, INSA-Lyon, 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

michael.vannier@insa-lyon.fr

Un certain nombre de modèles déjà existants permettent de prédire la sonie de manière satisfaisante pour des sons stationnaires, en situation d'écoute monaurale, diotique ou dichotique de niveaux (ISO532-B, ANSI-S3.4). Cependant, quelques études récentes (Sivonen et Ellermeier, 2006, 2007, 2008) ont mis en évidence l'évolution de la sonie en fonction de l'angle d'incidence, pour une source de bruit diffusée en champ libre ou en champ réverbérant. Un nouveau modèle de sommation binaurale, avec un gain de 3 dB, a alors été proposé par les auteurs. En revanche, peu d'études ont été menées, concernant la sonie en présence de plusieurs sources simultanées. Une étude récente s'est intéressée à l'influence de la distribution de deux sources tonales simultanées dans le plan horizontal pour des angles d'incidence de 10 et 30° (Song, 2007). L'objectif de la présente étude est d'apporter de nouveaux éléments dans la modélisation de la sonie pour des champs acoustiques complexes, faisant intervenir une source multi-tonale ou plusieurs sources tonales simultanées. Une première partie est consacrée à l'étude de la sonie directionnelle d'une source de bruit bitonale (comportant deux composantes fréquentielles centrées à 1 kHz et 5 kHz), dans le plan horizontal. Le but est de tester l'hypothèse suivant laquelle, la sonie directionnelle d'une source multi-tonale pourrait être entièrement expliquée par les sonies directionnelles de chacune de ses composantes tonales. La deuxième partie de l'étude porte sur l'influence de la distribution spatiale de deux sources tonales sur la sonie. Les travaux menés par Song (2007) ont montré qu'il n'y avait pas d'effet de la distribution des sources pour des angles d'incidence de 10 et 30°. L'expérience présentée ici vise à vérifier cette hypothèse pour des grands angles d'incidence (60 et 90°) faisant intervenir des grandes différences interaurales, et donc à valider l'hypothèse dans des situations d'écoute fortement dichotiques.

1 Introduction

Un certain nombre de modèles déjà existants permettent de prédire la sonie de manière satisfaisante pour des sons stationnaires, à partir d'enregistrements réalisés à l'aide d'un simple microphone ou d'une tête artificielle ([1], [2]). La validation de ces modèles est principalement basée sur des mesures réalisées en situation d'écoute monaurale, diotique ou dichotique de niveaux. Cependant, dans une situation "naturelle" d'écoute, l'acoustique du lieu ou le filtrage du son par la tête de l'auditeur fournissent une combinaison des indices binauraux plus complexe, permettant notamment "l'extériorisation" et la localisation des sources.

Robinson et Whittle [3], puis plus récemment Sivonen et Ellermeier [4], ont mis en évidence l'évolution de la sonie en fonction de l'angle d'incidence et de la fréquence pour une source "réelle" de bruit à bande étroite, diffusée en champ libre à l'aide de haut-parleurs. Un modèle de sommation binaurale a alors été proposé par les auteurs à partir des niveaux SPL aux oreilles ($L_{mon} = g \times \log_2 [2^{L_G/g} + 2^{L_D/g}]$, où L_{mon} est le niveau monaural équivalent (produisant la même sonie) et g le gain binaural). La valeur du gain binaural variait suivant les auteurs entre 6 dB [3] et 3 dB [4], correspondant à des rapports de sonie binaural-à-monaural de 1.5 et 1.2 (sommation de sonie binaurale "moins que parfaite"). D'autres travaux ont également souligné la robustesse du gain binaural $g = 3$ dB pour une source de bruit large-bande en champ libre [5], gain revu cependant à la baisse ($g = 2$ dB) pour une source de bruit à bande-étroite en champ réverbérant [5].

La prise en compte de ces nouvelles données (entre autres) a été proposée par Moore et Glasberg [6], la sommation binaurale "moins-que parfaite" ayant été interprétée par l'existence d'inhibitions interaurales.

Très peu d'études ont cependant été menées, concernant la sonie en présence de plusieurs sources réelles simultanées. Song [7] s'est intéressé à l'influence de la distribution de deux sources simultanées dans le plan horizontal. L'objectif de l'expérience était de comparer la sonie de deux composantes de bruit à bande étroite (centrées à 1 kHz et 3.15 kHz) focalisées sur un haut-parleur frontal avec la sonie de ces deux mêmes composantes distribuées symétriquement de part et d'autre de la tête de l'auditeur suivant des angles

d'incidence de 10 ou 30°. Aucun effet de la distribution des sources n'a été observé.

L'objectif de la présente étude est d'apporter de nouveaux éléments dans la modélisation de la sonie pour des champs acoustiques complexes, faisant intervenir une source multi-tonale ou plusieurs sources tonales simultanées.

Une première partie est consacrée à l'étude de la sonie directionnelle d'une source de bruit à deux composantes fréquentielles (centrées à 1 kHz et 5 kHz), dans le plan horizontal. Dans une expérience préliminaire, les sensibilités directionnelles en sonie ("DLS" pour Directional Loudness Sensitivities), correspondant à la sonie d'une source d'incidence non-nulle par rapport à la sonie de la même source d'incidence frontale, avaient été mesurées sur 14 auditeurs pour chacune des deux composantes tonales. Dans cette nouvelle expérience, la sensibilité directionnelle en sonie est estimée pour les 14 mêmes auditeurs, mais pour une source bitonale composée de la somme des deux composantes tonales (1 kHz+5 kHz). Chaque composante a été au préalable égalisée en sonie en accord avec les DLS individuelles obtenues dans l'expérience préliminaire, dans le but de tester l'hypothèse suivant laquelle la DLS pour une source complexe multi-tonale pourrait être simplement décomposée comme la somme des DLS pour chacune de ses composantes tonales.

La deuxième partie de l'étude porte sur l'influence de la distribution spatiale de deux sources tonales sur la sonie. Les travaux menés par Song ([7]) pour des angles d'incidence de 10 et 30°, ont montré qu'il n'y avait pas d'effet de la distribution des sources sur la sonie. L'expérience présentée ici vise à tester cette hypothèse pour des grands angles d'incidence (60 et 90°) faisant intervenir des grandes différences interaurales, et donc à valider l'hypothèse dans des situations d'écoute réalistes, fortement dichotiques.

Enfin, plusieurs modèles de sonie binaurale ont été testés sur les données subjectives. Un modèle a été retenu, permettant de prédire la sonie de manière satisfaisante pour les champs acoustiques étudiés.

2 Méthode générale

2.1 Auditeurs

Quatorze auditeurs (sept hommes et sept femmes), âgés de 24 à 49 ans ont été sollicités pour participer à cette expérience. Six des auditeurs pouvaient être considérés comme normo-entendants (seuils < 20 dB HL). Les huit autres présentaient des pertes auditives légères unilatérales ou bilatérales à certaines fréquences (seuils audiométriques compris entre 25 et 40 dB HL). Les auditeurs étaient indemnisés pour leur participation.

2.2 Dispositif expérimental

La procédure était implémentée dans Matlab. Les sons étaient générés à l'aide d'une carte son Echo Gina 24 (24 bits, 44100 Hz) puis restitués à l'auditeur à l'aide d'un casque Sennheiser HD 650, dans une cabine audiométrique. Un écran était utilisé pour l'affichage, un clavier numérique était utilisé comme terminal de réponse.

2.3 Stimuli

Les stimuli sources utilisés étaient des bruits roses filtrés par bandes de tiers d'octave centrées à 1 kHz et 5 kHz. La durée des stimuli était de 1 s, incluant une croissance et une décroissance en cosinus de 20 ms au début et à la fin du son.

Les bruits à bande étroite obtenus étaient ensuite filtrés suivant le principe de la synthèse binaurale générique ([8]), permettant de simuler au casque des sources réelles situées à 2 m du centre de la tête de l'auditeur, pour divers angles d'incidence. Les réponses impulsionnelles binaurales utilisées ont été préalablement mesurées sur une tête artificielle (Cortex Mk1) en champ libre, puis corrigées par les fonctions de transfert génériques inverses (gauches et droites) du casque utilisé pour les mesures de sonie.

Tous les stimuli utilisés dans cette expérience étaient finalement des sons stéréophoniques, résultant de la sommation de deux composantes spectrales centrées à 1 kHz et 5 kHz, indépendamment spatialisées dans le plan horizontal. Ces stimuli permettaient ainsi de simuler : soit une source bitonale (deux composantes spectrales), soit deux sources tonales simultanées distribuées dans le plan horizontal. La liste complète des différents stimuli synthétisés est détaillée dans le tableau 1.

Les différents stimuli ont été calibrés dans l'optique d'établir l'isonomie à 60 phones de chaque composante dans toutes les configurations de l'expérience (isonomie entre les deux composantes fréquentielles d'une part, isonomie de chaque composante en fonction de l'angle d'azimut d'autre part).

Pour le stimulus A d'incidence frontale, chaque composante a été calibrée à 60 phones en "équivalent champ diffus". Pour les autres stimuli (B à H), d'angles d'incidences non nuls, une correction supplémentaire du niveau a été effectuée pour chaque composante, afin d'égaliser la sonie de la composante d'incidence non nulle par rapport à la sonie de la même composante d'incidence frontale à 60 phones. Cela a ainsi permis de compenser l'effet de l'angle d'azimut sur la variation de la sonie (cf. "DLS", [4]). Les gains utilisés pour cette correction étaient égaux aux seuils d'ajustements obtenus au cours d'une campagne de mesures

TABLEAU 1 – Liste et composition des 8 stimuli synthétisés.

Stim.	1 ^{re} Composante			2 ^e Composante		
	Fréq.	Az.	Côté	Fréq.	Az.	Côté
A	1 kHz	0°	-	5 kHz	0°	-
B	1 kHz	30°	G	5 kHz	30°	G
C	1 kHz	60°	G	5 kHz	60°	G
D	1 kHz	90°	G	5 kHz	90°	G
E	1 kHz	60°	G	5 kHz	60°	D
F	1 kHz	60°	D	5 kHz	60°	G
G	1 kHz	90°	G	5 kHz	90°	D
H	1 kHz	90°	D	5 kHz	90°	G

préliminaires de sonie directionnelle avec les mêmes auditeurs. Les mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales, mais indépendamment pour chacune des composantes tonales. La figure 1 représente les DLS obtenues pour chaque auditeur et pour chaque composante. La DLS correspond à l'opposé du niveau d'ajustement de la source spatialisée par rapport à la source frontale de référence pour que les deux aient la même sonie.

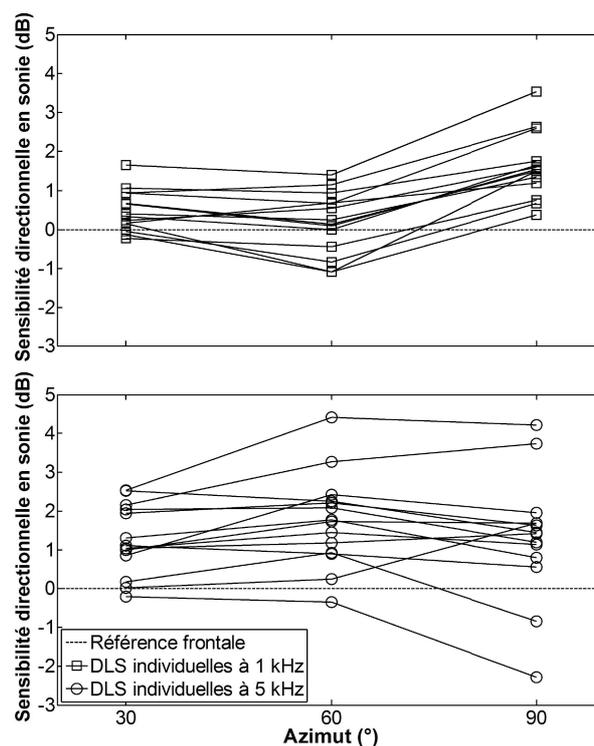


FIGURE 1 – Sensibilités directionnelles en sonie (DLS) à 30, 60 et 90° d'azimut, mesurées pour chacun des 14 auditeurs, dans le cas d'une simple source de bruit à bande étroite centrée à 1 kHz (en haut) ou 5 kHz (en bas).

Etant donnée l'importance des différences inter-individuelles qui opèrent (même ordre de grandeur que dans les travaux de Sivonen [9]), les gains correctionnels appliqués pour chaque composante et chaque azimuth ont également été individualisés pour chaque auditeur.

2.4 Procédure

L'objectif général de l'expérience était toujours de mesurer le point d'égalité subjective (PSE) en sonie entre un stimulus complexe à deux composantes d'incidences variables (A à H) et un stimulus complexe à deux composantes de référence, d'incidence frontale (A).

Les PSEs ont été mesurés à l'aide d'une procédure adaptative à choix forcé sur deux intervalles (2I-2AFC), suivant une règle 1-down/1-up, permettant d'estimer le point à 50% de bonnes réponses sur la fonction psychométrique.

Chaque essai consistait à présenter successivement un son de comparaison (de niveau variable) et le son frontal de référence (de niveau fixe). L'intervalle inter-stimuli (ISI) était fixé à 500 ms. L'ordre de présentation des deux sons était choisi de manière aléatoire à chaque essai afin d'éviter les erreurs systématiques de type "Time-order errors". Il était alors demandé à l'auditeur de désigner le son qu'il percevait comme étant le plus fort (1 ou 2). Selon la réponse de l'auditeur, le niveau du son de comparaison était alors augmenté ou diminué d'un pas de variation de 4 dB jusqu'à la 2^e inversion, de 2 dB jusqu'à la 4^e inversion puis de 1 dB jusqu'à la fin de la mesure (10 inversions). Le niveau relatif du son de comparaison par rapport au son de référence était limité dans l'intervalle [-15 dB, +15 dB] afin de prévenir de toute atteinte à la santé des auditeurs. Un seuil était finalement calculé pour chaque mesure en faisant la moyenne arithmétique du niveau relatif du son de comparaison (par rapport au son de référence) sur les six dernières inversions.

Il y avait en tout 8 conditions correspondant aux différents stimuli à tester (A à H). Pour chaque condition, deux mesures étaient effectuées avec des niveaux relatifs de départ différents pour le son de comparaison (+10 dB ou -10 dB). Chaque mesure était ensuite répétée quatre fois. L'estimation du PSE pour chaque condition, était finalement définie comme la moyenne des 8 seuils obtenus (2 niveaux de départ \times 4 répétitions).

Un total de 64 mesures a été ainsi réalisé par chaque auditeur. Les mesures étaient réparties en 8 blocs de 8 mesures, de manière pseudo-aléatoire (en limitant à 2 le nombre de répétitions d'une même condition au sein du même bloc). Les 8 mesures de chaque bloc étaient entrelacées de manière aléatoire. Ainsi, pour chaque présentation, la paire de sons présentée correspondait à une des 8 mesures du bloc, sélectionnée au hasard.

L'ordre de présentation des 8 blocs était également tiré au sort pour chacun des auditeurs. Le test était ensuite réparti en 2 séances de 1h.

3 Sonie directionnelle d'une source bitonale

La première partie de l'expérience concerne les stimuli A à D, simulant une source bitonale pour différents angles d'azimuts (0°, 30°, 60° et 90°). L'objectif était d'évaluer la sonie directionnelle d'une source multi-tonale dans le plan horizontal, en s'affranchissant au préalable de la sonie directionnelle propre à chacune de ses composantes tonales (cf. § 2.3).

3.1 Résultats

Les sensibilités directionnelles en sonie, sont définies comme l'opposé du seuil d'ajustement au point d'égalité subjective en sonie. Une valeur négative correspond à un seuil d'ajustement positif au PSE et indique donc que le son de comparaison a été perçu moins fort que le son frontal de référence (et inversement).

Les sensibilités directionnelles individuelles et médianes sur l'ensemble des 14 auditeurs sont représentées dans la figure 2, en fonction de l'angle d'azimut.

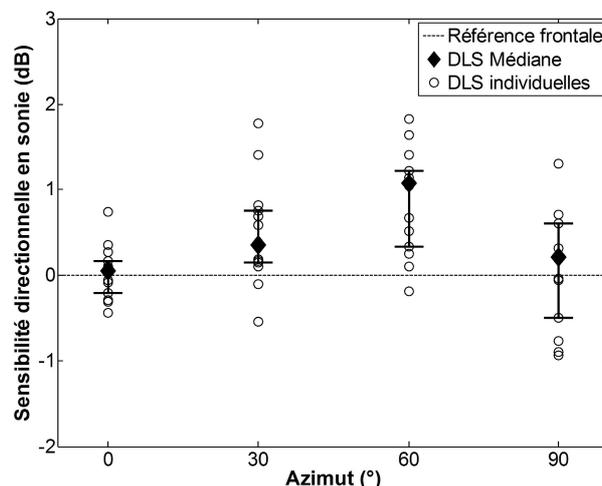


FIGURE 2 – DLS individuelles (cercles) et médianes sur les 14 auditeurs (losanges), en fonction de l'angle d'azimut. Les barres d'erreur représentent les écarts interquartiles.

Pour la condition test (à 0° d'azimut), tous les auditeurs ont été en mesure d'égaliser correctement ($|DLS| < 0.7 \text{ dB}$) le stimulus A de référence avec lui-même.

Concernant les données médianes sur l'ensemble des auditeurs, les DLS estimées à 0 et 90° d'azimut (respectivement 0.1 et 0.2 dB) sont très proches de zéro. Une *test des signes* bilatéral sur chaque médiane a permis de montrer que les valeurs obtenues à 0° et 90° sont statistiquement égales à zéro, contrairement aux deux autres à 30° et 60° ($p < 0.01$). La médiane augmente à 30 et 60°, atteignant la valeur maximale de 1.1 dB à 60°. Une ANOVA à mesures répétées a permis de mettre en avant l'effet très significatif de l'azimut sur la sonie [$F(3, 39) = 13.6$; $p < 0.001$]. Un test post-hoc (HSD de Tuckey) a également permis de préciser l'augmentation très significative de la sensibilité directionnelle lorsque la source est à 60° par rapport aux angles 0 et 90° ($p < 0.001$). Il n'y a cependant pas de différence de sensibilité entre les angles 30 et 60°.

D'autre part, les écarts-interquartiles inférieurs ou de l'ordre du dB à 90° d'azimut, traduisent la faible variabilité interindividuelle. Le plus grand écart de seuil entre deux auditeurs est de 2.3 dB (à 30° d'azimut). Les écarts entre les seuils estimés pour les auditeurs extrêmes (ayant obtenu les seuils max. et min. pour une condition donnée) restent cependant significatifs à 30°, 60° et 90° ($K - S$; $p < 0.01$).

3.2 Discussion

Chaque composante tonale (1 kHz et 5 kHz) des sources bitonales simulées, a été préalablement égalisée en sonie par rapport à l'incidence frontale pour chaque auditeur (cf. §2.3).

Les médianes obtenues sur l'ensemble des auditeurs sont toutes proches de zéro, mais il existe un effet léger de l'angle d'azimut sur la sensibilité directionnelle de la source bitonale. Les DLS médianes obtenues à 30° et 60° d'azimut sont en effet plus grandes, atteignant la valeur maximale de 1.1 dB à 60° d'azimut, et significativement différentes de zéro. L'hypothèse de départ ne serait donc pas vérifiée, la sonie directionnelle d'une source multi-tonale à deux composantes ne pouvant pas être entièrement expliquée par la somme des sonies directionnelles de chacune de ses composantes. L'effet directionnel supplémentaire mesuré spécifiquement pour une sources bitonale reste cependant très faible et observé sur un petit échantillon (14 auditeurs).

D'autre part, il existe des différences entre les auditeurs, mais la variabilité interindividuelle reste faible. Par comparaison, les différences interindividuelles observées pour une source à deux composantes (Fig. 2) sont fortement réduites par rapport à celles observées pour chacune des composantes (Fig. 1), notamment à 5 kHz. D'après la figure 1, à 5 kHz les DLS des différents auditeurs s'étaient respectivement sur un intervalle de 2.75, 4.77 et 6.50 dB à 30, 60 et 90° d'azimut (mêmes ordres de grandeur que dans l'étude de Sivonen, [9]). Pour les sources bitonales, ces mêmes plages de variations deviennent 2.32, 2.02 et 2.25 dB (cf. Fig. 2).

Prendre en compte les sensibilités directionnelles individuelles pour chaque composante tonale mène donc à réduire fortement la variabilité interindividuelle dans les mesures de la DLS du son multi-tonal.

Cela traduit principalement deux choses : d'une part l'importance du rôle joué par les DLS de chaque composante tonale dans la DLS du son multi-tonal (bien que la totalité de la DLS du son multi-tonal ne puisse pas être entièrement expliquée par les DLS de chaque composante), d'autre part la robustesse et la pérennité des DLS individuelles (les deux expériences ayant été réalisées à plus d'un an d'intervalle).

4 Sonie de deux sources tonales simultanées, distribuées dans le plan horizontal

La deuxième partie de l'expérience concerne les stimuli E à H, simulant deux sources tonales simultanées (centrées à 1 kHz et 5 kHz) et distribuées dans le plan horizontal. L'objectif était d'évaluer l'effet de la distribution des sources dans le plan horizontal sur la sonie, pour des angles d'incidence supérieurs à 30°.

4.1 Résultats

La figure 3 représente les sensibilités en sonie individuelles (cercles) et médianes sur l'ensemble des 14 auditeurs (losanges) obtenues pour chacune des conditions expérimentales. Les barres d'erreur représentent les écarts interquartiles. Les sources étaient distribuées de manière symétrique par rapport au plan sagittal, suivant des angles de 60 ou 90° (1 kHz à gauche et 5 kHz à droite, ou inversement). Les stimuli E et F correspondaient à un angle d'incidence de 60°, la composante à 5 kHz était présentée à droite pour E et à gauche pour F. De la même manière, les stimuli G et H correspondaient à un angle d'incidence de 90°,

la composante à 5 kHz étant présentée respectivement à droite et à gauche (la composition détaillée des stimuli est présentée dans le tableau 1).

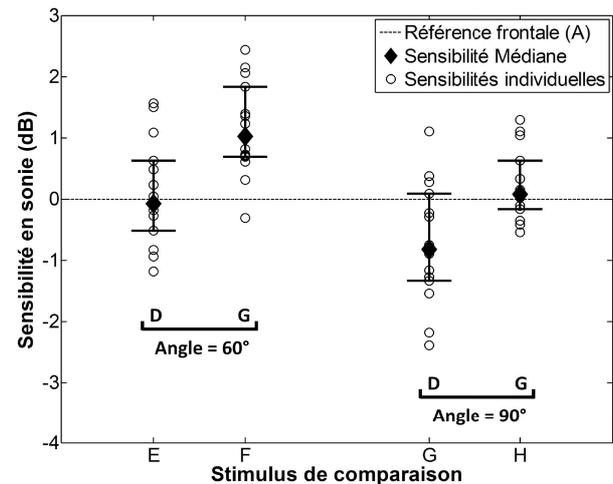


FIGURE 3 – Sensibilités en sonie individuelles et médianes, en fonction de l'angle d'incidence (60 ou 90°) et du côté de présentation (G ou D) de la composante à 5 kHz.

En accord avec les données individuelles, les sensibilités médianes obtenues sont toujours plus grandes quand la composante à 5 kHz est à gauche. De plus, pour un même côté de présentation, les médianes estimées pour des sources à 60° d'azimut sont toujours plus grandes que les médianes obtenues à 90°.

Une ANOVA à mesures répétées a permis de souligner la significativité des effets observés de l'angle d'incidence [$F(1, 13) = 60.88 ; p < 0.001$] et du côté de présentation des composantes [$F(1, 13) = 21.75 ; p < 0.001$]. Il n'y a cependant aucune interaction entre ces deux facteurs.

Les résultats obtenus dans le cas de deux sources distribuées (stimuli E, F, G et H) ont ensuite été comparés avec les résultats obtenus dans le cas où les deux sources étaient focalisées (c.a.d. dans le cas d'une source bitonale), pour les mêmes angles d'incidence (stimuli C et D). Les différences de sensibilité entre "sources distribuées" et "sources focalisées" ont été calculées et sont représentées dans la figure 4. Pour les stimuli E et F (60° d'incidence), la différence (Distribué – Focalisé) représente la différence entre les sensibilités en sonie mesurées pour E et F et celle mesurée pour C. De la même manière, pour les stimuli G et H (90° d'incidence), la différence de sensibilité représente la différence entre les sensibilités mesurées pour G et H et celle mesurée pour D. Les losanges et les barres d'erreurs représentent respectivement la médiane de cette différence sur l'ensemble des auditeurs et les écarts interquartiles associés.

Etant donné que les sources focalisées considérées pour le calcul de la différence de sensibilité ont le même angle d'incidence que les sources distribuées, l'écart des données médianes à la valeur zéro, reflète nécessairement un effet lié à la distribution des sources.

On constate qu'à 60° d'incidence, comme à 90° d'incidence, les valeurs de la médiane sont très proches de zéro lorsque la composante à 5 kHz a été présentée à gauche. En revanche, lorsque cette dernière a été présentée à droite, la différence de sensibilité prend les valeurs de -0.74 et -0.87 dB à 60 et 90° d'azimut, respectivement. Quatre tests

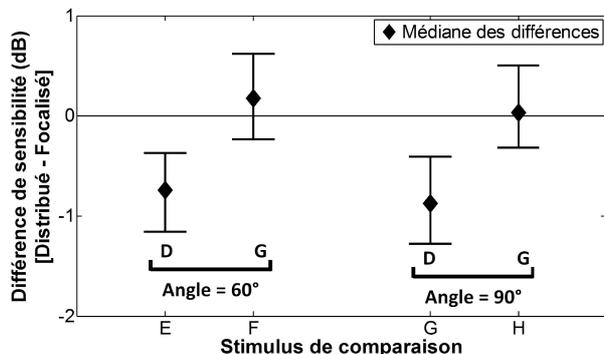


FIGURE 4 – Différence de sensibilité médiane (Distribué – Focalisé), en fonction de l'angle d'incidence (60 ou 90°) et du côté de présentation (G ou D) de la composante à 5 kHz.

des signes bilatéraux, menés pour chacune des conditions expérimentales, ont montré que seules les médianes obtenues pour les stimuli E et G sont significativement différentes de zéro ($p < 0.01$).

Cela traduit une diminution de la sonie induite par la distribution des sources, dans le cas où la composante à 5 kHz est distribuée à droite, uniquement. Cette diminution de la sonie reste cependant faible, correspondant à un écart d'ajustement inférieur à 1 dB. Dans le cas où la composante à 5 kHz est présentée à gauche, il n'y a strictement aucun effet de la distribution des sources.

4.2 Discussion

L'effet de l'angle d'incidence sur la sensibilité en sonie pour deux sources distribuées est en accord (et du même ordre de grandeur) avec les mesures de sensibilité directionnelle effectuées dans la première partie de l'expérience lorsque les deux sources étaient focalisées.

En revanche, la différence systématique des résultats constatée, selon le côté de présentation de la source à 5 kHz suscite une interrogation quant à la pertinence de ce résultat d'un point de vue perceptuel. L'effet observé implique une dissymétrie entre la gauche et la droite dépendante de la fréquence, soit au niveau de la restitution, soit d'un point de vue perceptuel. Les signaux restitués à gauche et à droite étaient strictement symétriques entre les conditions E et F et entre les conditions G et H, seule la correction de la réponse du casque pour chaque oreille restait inchangée quelque soit la condition. Des mesures supplémentaires ont alors été menées et ont révélé une sous-estimation d'environ 1.5 dB dans la correction du casque apportée pour l'oreille droite à 5 kHz, pouvant correspondre à la sous-estimation systématique de la sonie constatée lorsque la composante à 5 kHz était présentée à droite. De plus, l'erreur de reproductibilité entre deux mesures de réponse du casque pouvait atteindre jusqu'à 2 dB à 5 kHz (estimation basée sur 30 répétitions de la mesure avec repositionnement du casque). Les réponses utilisées dans la synthèse ayant été obtenues à partir de 3 mesures seulement, la dissymétrie introduite dans les réponses du casque correspondrait donc à une erreur d'échantillonnage, probablement à l'origine de la dissymétrie observée en sonie. D'un point de vue perceptuel, il n'existe pas à notre connaissance de littérature mettant en avant une telle dissymétrie. Dans les travaux de Song [7], aucun effet du côté de présentation n'a été constaté pour des

angles d'incidence inférieurs à 30° (les composantes tonales étaient centrées à 1 et 3.15 kHz).

Concernant l'effet de la distribution des sources, la méthode employée a permis de s'affranchir de tous les effets pouvant être induits par l'angle d'incidence de la source, et d'extraire uniquement les effets causés par la distribution des sources. La distribution n'a pas d'effet sur la sonie quand la composante à 5 kHz est présentée à gauche. Lorsque cette dernière est présentée à droite, une faible diminution de la sonie a été constatée. Une erreur dans la correction du casque appliquée lors de la restitution fournit une explication plausible de cette dissymétrie. On considèrera donc d'une manière générale qu'il n'y a pas d'effet notable de la distribution des sources sur la sonie pour des grands angles d'incidence.

5 Modélisation

Afin de tester les modèles de sonie binauraux sur les données expérimentales, les niveaux SPL "aux tympans" ont été mesurés pour tous les stimuli (A à H), dans les mêmes conditions de restitution, strictement, que celles de l'expérience. Chaque stimulus était au préalable ajusté au PSE pour chaque auditeur (ajustement basé sur les seuils obtenus pour chaque condition expérimentale), puis diffusé au casque et enregistré "aux tympans" sur la tête artificielle (la même que celle utilisée pour les mesures d'HRTFs et de réponse en fréquence du casque). Les niveaux SPLs gauches et droits étaient ensuite directement calculés à partir des signaux enregistrés.

La figure 5 représente le rapport entre la sonie calculée pour le son de comparaison (N_{COMP}) et la sonie calculée pour le son de référence (N_{REF}) au PSE, pour chaque condition expérimentale. Chaque point représente la valeur médiane du rapport N_{COMP}/N_{REF} sur l'ensemble des 14 auditeurs (les barres d'erreurs associées représentent les écarts interquartiles). Plus la valeur du rapport est proche de 1, plus les valeurs de sonie estimées par le modèle pour les deux sons sont proches (valeurs normalement égales au PSE) et donc plus le modèle testé est performant. Trois modèles de sonie binaurale ont été comparés : 1) le modèle de Moore ([10]) consistant à sommer directement les sonies calculées à gauche et à droite 2) le modèle de Sivonen ([9]) basé sur une règle de sommation logarithmique des niveaux SPLs gauches et droits, avec un gain binaural $g = 3 \text{ dB}$ suggéré par les auteurs 3) le modèle de Sivonen ([9]) avec un gain binaural $g = 4.5 \text{ dB}$, optimisé à partir des DLS obtenues pour une source tonale (cf. Fig. 1).

D'après la figure 5, les trois modèles fonctionnent relativement bien pour toutes les configurations de l'expérience. D'après les valeurs médianes, l'erreur de prédiction de la sonie du son de comparaison par rapport au son de référence ne dépasse jamais 10%.

Le modèle de Sivonen pour $g = 3 \text{ dB}$ a cependant tendance à surestimer la sonie du son de comparaison, tandis que le modèle de Moore a tendance au contraire à la sous-estimer. Le modèle le plus performant est le modèle de Sivonen avec un gain binaural $g = 4.5 \text{ dB}$. Ce modèle permet de prédire avec précision les données médianes pour la condition test (A) et les stimuli F et H. Les moins bonnes prédictions sont obtenues pour les conditions D et G pour lesquelles la valeur "1" n'est pas comprise dans l'écart

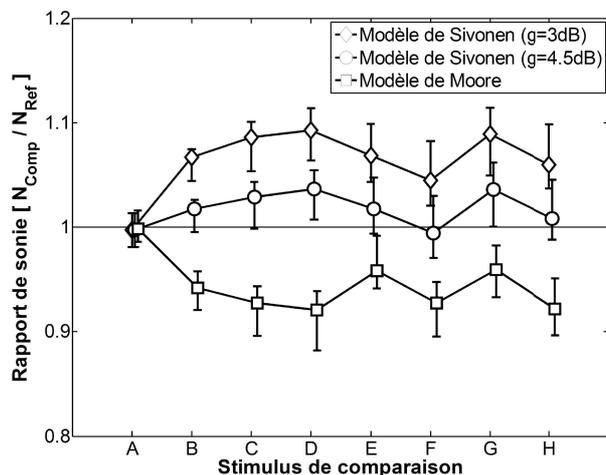


FIGURE 5 – Prédiction du rapport de sonie au PSE entre le son de comparaison et le son de référence frontal, pour les différentes conditions expérimentales.

interquartile. Cependant, même pour ces conditions, la surestimation de la sonie du son de comparaison est faible et n'excède pas 3% par rapport à la sonie du son de référence.

Finalement, en considérant un gain binaural $g = 4.5 \text{ dB}$, le modèle de Sivonen est un modèle de sonie binaural permettant des prédictions "relatives" satisfaisantes pour une ou deux sources tonales réelles (focalisées ou distribuées), valide notamment pour des grands angles d'incidence ($> 30^\circ$), et donc des grandes différences interaurales. Cependant, la validité du modèle pour prédire la sonie "absolue" d'un son à 2 composantes (en comparaison avec la sonie d'un son à 1 composante) n'a pas été traitée ici (cf. [7]).

6 Conclusion

La première partie de l'étude consistait à mesurer la sonie directionnelle d'une source bi-tonale (1 kHz + 5 kHz) à 0, 30, 60 et 90° d'azimut, en s'affranchissant au préalable de la sensibilité directionnelle individuelle en sonie pour chaque composante tonale. Les résultats ont montré qu'un faible effet de l'angle d'incidence sur la sonie persistait, réfutant donc en partie l'hypothèse de départ selon laquelle la sonie directionnelle d'une source multi-tonale pourrait être simplement décomposée comme la somme des sonies directionnelles de chacune de ses composantes tonales.

La prise en compte des sensibilités directionnelles individuelles pour chaque composante tonale a permis de réduire fortement la variabilité interindividuelle dans les mesures de sonie des sources bitonales. Cela traduit donc l'importance du rôle joué par les sonies directionnelles de chaque composante tonale dans la sonie directionnelle de la source multi-tonale. Cela prouve également la robustesse des sensibilités directionnelles individuelles.

La deuxième partie de l'étude consistait à évaluer l'influence de la distribution spatiale de deux sources tonales (1 kHz et 5 kHz) simultanées sur la sonie, pour des grands angles d'incidence (60° et 90°). La méthode utilisée permettait de s'affranchir totalement des effets induits par l'angle d'incidence sur la sonie. D'une manière générale, les résultats ont mené à conclure que la distribution n'avait pas d'effet notable sur la sonie de deux sources tonales

simultanées.

Finalement, plusieurs modèles de sonie binaurale ont été testés sur les données subjectives recueillies. Un modèle de sommation binaurale avec un gain de 4.5 dB a été proposé, sur la base du modèle de Sivonen et Ellermeier [4]. Il permet de prédire la sonie de manière satisfaisante pour une ou plusieurs sources tonales, focalisées ou distribuées. Sa validité a été montrée pour des grands angles d'incidence ($> 30^\circ$), et donc dans des situations d'écoute réalistes, fortement dichotiques.

Remerciements

Travail mené dans le cadre du LabEx CeLyA ("Centre Lyonnais d'Acoustique", ANR-10-LABX-60) et soutenu par l'ANR (projet "Loudnat", convention ANR-11-BS09-016-01).

Références

- [1] ISO-532B. Méthode de calcul du niveau d'isophonie. *norme internationale*, 1975.
- [2] ANSI-S3.4. Procedure for the computation of loudness of steady sounds. *American National Institute, New York, USA*, 2005.
- [3] D W Robinson and L S Whittle. The loudness of directional sound fields. *Acustica*, 10 :74–80, 1960.
- [4] Ville Pekka Sivonen and Wolfgang Ellermeier. Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119 :2965, 2006.
- [5] Ville Pekka Sivonen. Directional loudness and binaural summation for wideband and reverberant sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5) :2852–2861, 2007.
- [6] Brian CJ Moore and Brian R Glasberg. Modeling binaural loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121 :1604, 2007.
- [7] Wookeun Song. *Beamforming applied to psychoacoustics*. PhD thesis, Sound Quality Research Unit (SQRU) Section of Acoustics, Department of Electronic Systems Aalborg University, Denmark, 2007.
- [8] Henrik Møller. Fundamentals of binaural technology. *Applied acoustics*, 36(3) :171–218, 1992.
- [9] Ville Pekka Sivonen and Wolfgang Ellermeier. Binaural loudness for artificial-head measurements in directional sound fields. *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(6) :452–461, 2008.
- [10] Brian CJ Moore, Brian R Glasberg, and Thomas Baer. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(4) :224–240, 1997.