

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Sonie directionnelle de bruits en basses fréquences : influence du mode de restitution

G. Berthomieu, V. Koehl et M. Paquier
Lab-STICC, Université de Brest, 6 avenue Le Gorgeu, 29200 Brest, France
gauthier.berthomieu@univ-brest.fr

De précédentes études ont révélé un effet significatif de la différence interaurale de temps (ITD) lors de la sommation de sonie binaurale, augmentant la sonie de sons purs basses fréquences présentant une disparité temporelle interaurale. Cet effet joue vraisemblablement un rôle dans le phénomène de sonie directionnelle lorsque la source comporte du contenu basses fréquences, pour lesquelles l'ITD constitue le principal indice de localisation. Il n'a jusqu'alors été étudié que pour des sons diffusés au casque, s'éloignant ainsi totalement des conditions d'écoute naturelles. Afin d'étendre la validité de ces résultats à des stimuli restitués par des haut-parleurs, vingt sujets normo-entendants ont effectué des comparaisons de sonie à partir de bruits en basses fréquences dont la largeur de bande était de 1 ERB, diffusés par des haut-parleurs placés de face ou sur le côté et à différentes distances du point d'écoute. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus lorsque les mêmes signaux étaient diffusés au casque.

1 Introduction

1.1 Sonie directionnelle

La position d'une source sonore, en particulier sa direction par rapport à l'auditeur dans le plan transversal, joue un rôle non négligeable sur la sonie des sons qu'elle émet [1, 2]. Ce phénomène, appelé sonie directionnelle, est largement expliqué par les variations de pression sonore aux oreilles de l'auditeur. Ces variations, dues au filtrage du son par le corps, la tête et les oreilles de l'auditeur, provoquent une variation du niveau sonore physique de ce son, principal facteur de la sensation de sonie. Cependant, la sonie directionnelle a également été observée pour des bruits à bande étroite centrés sur 400 Hz [2], où l'effet de filtrage du corps est moindre [3]. Les modifications de pression aux oreilles étant faibles pour des sources distantes, elles ne semblaient ainsi pas pouvoir expliquer intégralement la sonie directionnelle observée. De plus, les modèles de sonie prenant en compte les pressions aux oreilles comme paramètre d'entrée ont tendance à sous-estimer les phénomènes de sonie directionnelle observés expérimentalement [4]. Cela suggère que les modifications de pression aux oreilles ne sont pas les seules responsables de ce phénomène.

1.2 ITD et sonie

Lorsqu'un son provient du côté de la tête, il atteint d'abord une oreille, puis l'autre oreille après un laps de temps défini par la vitesse de propagation du son autour de la tête. Cette différence interaurale de temps (ITD) induit pour les sons purs une différence interaurale de phase (IPD), et ces deux indices peuvent être utilisés par le cerveau pour localiser les sons [3]. Puisque des variations de sonie avec la localisation ont été observées pour des fréquences relativement faibles, plusieurs études ont été menées concernant l'influence de l'ITD/IPD sur la sonie. Ainsi, Koehl et Paquier [5] ont poursuivi les recherches concernant l'effet de l'ITD sur la sonie entamées par Mulligan *et al.* [6] pour des sons purs binauraux. Les auteurs ont reporté une augmentation de sonie avec l'ITD pour les deux fréquences testées (200 et 400 Hz) à faible niveau (40 phones). Plus l'ITD était importante (allant jusqu'à 772 μ s, correspondant à un angle d'incidence de 90° d'après le modèle basse fréquence de Kuhn [7]), plus l'augmentation de sonie l'était également. Cet effet était symétrique, et aucun effet significatif n'a été reporté au niveau moyen testé (70 phones). Puisque la sonie peut être affectée par des processus de haut-niveau – tels que la constance de sonie observée avec la perception de la distance [8] – Koehl *et al.*

ont mis en place une deuxième expérience [9], dans laquelle les sons étaient présentés avec une ITD et une différence interaurale de niveau (ILD). Deux situations ont été testées : l'une dans laquelle ITD et ILD étaient congruentes (auquel cas la localisation induite par l'ITD était renforcée par l'ILD) ou opposées (auquel cas la localisation induite par l'ITD était neutralisée par l'ILD). La sonie directionnelle alors observée était indépendante du fait que les deux indices soient congruents ou opposés, renforçant l'hypothèse que la sonie directionnelle est due aux indices à proprement parler, et non à la localisation qu'ils induisent.

L'évolution de l'influence de l'ITD sur la sonie en fonction du niveau a été observé dans une étude antérieure [10] selon un protocole similaire, pour deux fréquences (100 et 200 Hz) et sept niveaux couvrant une large plage dynamique (de 30 à 90 phones). Les auteurs ont reporté une augmentation de sonie significative avec l'ITD jusqu'à 40 phones à 100 Hz, et jusqu'à 50 phones à 200 Hz. Cette augmentation, de l'ordre de 2 dB, est supérieure aux seuils différentiels d'intensité qui sont de l'ordre de 1,5 dB pour des sons purs de 100 Hz et de 1 dB à 200 Hz à 30 phones, et décroissent encore lorsque l'on augmente le niveau sonore [11].

1.3 Sonie directionnelle dans un environnement réel

Dans un environnement réel, le corps humain perçoit une multitude d'informations simultanées par l'intermédiaire de ses cinq sens. Si le cerveau est ainsi parfaitement entraîné à assembler ces informations pour les assimiler à des objets de son environnement, il n'est en revanche pas naturel de séparer ces informations et de les évaluer indépendamment les unes des autres. Il est donc, dans un environnement réel, difficile d'analyser la nature objective de chaque sensation produite par les objets qui nous entourent.

Dans le cadre d'études psychoacoustiques, les paramètres physiques d'un son peuvent être isolés pour étudier la sensation induite par chacun d'eux, indépendamment des autres. Cependant, lorsque le stimulus est présenté en tant qu'objet dans une situation proche d'un milieu naturel, ces sensations sont susceptibles d'être modifiées par les interactions entre chaque paramètre du stimulus. Il est alors nécessaire de vérifier la robustesse des effets produits par chaque paramètre étudié en laboratoire lorsque la validité écologique du contexte d'écoute augmente.

Dans le cas des études de l'effet de l'ITD sur la sonie, les sons utilisés étaient des sons purs, diffusés au casque et présentant comme seule différence interaurale une ITD fixe : trois conditions expérimentales affaiblissant la validité écologique du contexte d'écoute. Certaines relations entre le mode de restitution et la

sommation de sonie binaurale ont été révélées par le passé. A titre d'exemple, le rapport de sonie binaural-à-monaural (différence de sonie entre une écoute avec une seule oreille et une écoute diotique) est plus important lorsque l'écoute se fait avec un casque que lorsque des haut-parleurs sont utilisés [12]. L'écoute monaurale se faisait en diffusant les stimuli sur un seul canal lors de l'écoute au casque, et en bouchant une oreille du sujet lors de l'écoute sur haut-parleur. Ces résultats suggèrent que le mode de restitution est susceptible d'influencer la sensation de sonie produite par une source sonore.

Sivonen *et al.* ont comparé la sensibilité directionnelle en sonie (DLS, pour Directional Loudness Sensitivity) de bruits à bande étroite en fonction de leur localisation lorsqu'ils provenaient de haut-parleurs disposés autour du sujet [2] et lorsqu'ils étaient restitués au casque et localisés via les HRTF du sujet [13] dans des conditions anéchoïques. Lors de l'expérience concernant les sons diffusés au casque, le sujet était placé devant le même dispositif de haut-parleurs. Les bruits utilisés étaient filtrés sur un tiers d'octave, centrés sur 0,4, 1 et 5 kHz (où l'ILD joue un rôle vraisemblablement plus important sur la sommation de sonie binaurale qu'à 200 Hz). Pour les six sujets ayant passé les deux expériences (restitution au casque et sur haut-parleurs), les DLS n'étaient pas significativement dépendantes du mode de restitution. Dans ces expériences, les sujets disposaient du même support visuel (les haut-parleurs physiquement présents dans la pièce) qu'ils entendent les sons depuis les haut-parleurs ou depuis le casque. De plus, une étude de Langendijk et Bronkhorst [14] a montré qu'il n'était pas forcément possible de différencier des signaux diffusés au casque ou sur haut-parleurs. Six sujets experts normo-entendants échouaient à identifier la source de bruits large bande diffusés soit sur des haut-parleurs localisés à six positions différentes autour d'eux en azimut et en élévation, soit via un casque où les bruits étaient virtuellement localisés sur la position des haut-parleurs à l'aide des HRTF des sujets.

Lorsqu'une étude psychoacoustique est effectuée au casque exclusivement, le sujet ne dispose pas nécessairement d'indices visuels. Or, il existe de nombreux phénomènes résultant de l'interaction entre les modalités visuelle et auditive, pouvant notamment modifier la sonie [15]. L'évaluation de la sonie directionnelle peut ainsi probablement dépendre des indices visuels proposés au sujet.

La présente étude a pour objectif de comparer la différence de sonie induite par la latéralisation de bruits basses fréquences à bande étroite – où l'ILD est très faible – lorsqu'ils étaient diffusés via des haut-parleurs disposés autour du sujet, ou lorsqu'ils étaient diffusés via un casque. Dans ce dernier cas, les sons étaient préalablement enregistrés avec une tête binaurale placée à la position du sujet afin de s'assurer que les indices binauraux soient les mêmes dans chacun des deux modes de restitution. Cette étude se déroulait dans une pièce d'écoute traitée acoustiquement.

2 Protocole expérimental

Le test consistait en des égalisations de sonie de sons provenant d'azimuts variables (-90 , 0 et 90°) avec des

références frontales.

2.1 Procédure

Les points d'égalité subjective (PSE pour Point of Subjective Equality : niveau auquel un son est perçu au même niveau que le son de référence) étaient obtenus par une procédure à deux intervalles, deux alternatives à choix forcé (2I2AFC), suivant une règle 1-up 1-down [16]. A chaque essai, un son test (dont l'azimut était de -90 , 0 ou 90°) et un son de référence d'incidence frontale étaient présentés dans un ordre aléatoire, séparés par une pause de 500 ms. La tâche du sujet était d'indiquer lequel des deux sons était le plus fort, sans autre réponse possible et indépendamment de toute autre différence perçue. Le programme était écrit et exécuté sur MaxMSP et le sujet répondait à l'aide de deux boutons d'une manette.

Les sons tests étaient initialement diffusés avec un niveau de ± 10 dB par rapport aux sons de référence. Après réponse du sujet, leur niveau était baissé s'ils avaient été jugés plus forts que le son de référence, ou élevé s'ils avaient été jugés moins forts, pour converger vers le PSE [10].

2.2 Stimuli

Les sons employés au cours de cette expérience étaient des bruits à bande étroite, filtrés sur une largeur de bande rectangulaire équivalente à un filtre cochléaire (ERB) afin que toutes les composantes spectrales de ces bruits se trouvent dans la même bande critique [17].

Ces bruits filtrés étaient centrés sur 265 Hz puisque l'ITD augmente significativement la sonie de sons purs dans cette zone fréquentielle, avec un effet prédominant entre 200 et 400 Hz. La valeur de l'ERB à cette fréquence a été calculée d'après la formule suivante :

$$ERB_N = 24,7 * (4,37 * 10^{-3} * f + 1) \quad (1)$$

où f est exprimée en Hz, menant à une ERB de 53 Hz. Un bruit blanc large bande a été généré dans MATLAB, puis filtré en fixant l'amplitude de toutes les fréquences n'appartenant pas à $[238 \text{ Hz}; 291 \text{ Hz}]$ – correspondant à l'ERB autour de 265 Hz calculée ci-avant – à zéro [18]. Le niveau de référence était fixé au centre de la tête du sujet en son absence à 50 phons, correspondant à 58,4 dB SPL à 265 Hz d'après la norme ISO 226 [19]. La durée des stimuli était de 1,6 s, comportant des rampes d'entrée et de sortie de 100 ms.

2.3 Session 1 : Haut-parleurs

Afin de rapprocher les conditions d'écoute de l'expérience d'une situation plus réelle qu'une situation anéchoïque, la salle dans laquelle se déroulait l'expérience était une salle d'écoute acoustiquement traitée pour avoir un T_R60 de 0,3 s à 250 Hz [20], conformément à la norme IEC 60268-13 [21] concernant les caractéristiques de salles pour les tests d'écoute sur haut-parleurs. Puisque ce choix implique une situation d'écoute non anéchoïque, le test était répété lors de quatre sous-sessions concernant chacune une configuration spécifique dans la salle. Ainsi, quatre enceintes étaient réparties autour de la position du sujet à des angles de 0 , 90 , 180 et 270° en azimut, correspondant aux enceintes 1,

2, 3 et 4, respectivement. Chacune des quatre sous-sessions correspondait à une position du sujet différente, en face de l'enceinte 1, 2, 3 ou 4. L'ordre des sous-sessions était tiré aléatoirement pour chaque sujet. Les enceintes 1 et 2 étaient positionnées à 2 m du centre de la tête du sujet, et les enceintes 3 et 4 à 1 m (voir Figure 1). Le sujet était placé sur une chaise comportant un appui-tête et une mentonnière empêchant ses mouvements de tête.

Au début d'une sous-session, la chaise était orientée et

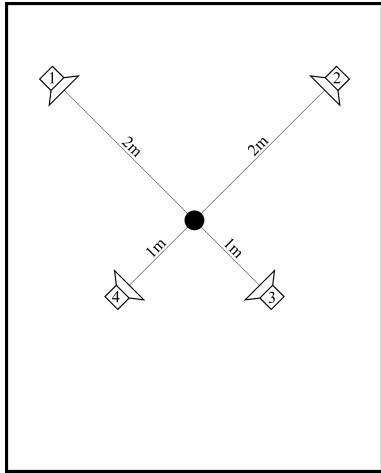


FIGURE 1 – Position des enceintes dans la salle d'écoute. La chaise est représentée par le point.

bloquée pour faire face à l'enceinte correspondant à la sous-session. Dans cette configuration, le sujet réalisait trois égalisations de sonie correspondant aux enceintes situées aux angles d'azimut -90 , 0 et 90° . Par exemple, pour la sous-session 4, le sujet faisait face à l'enceinte 4 et les égalisations se faisaient entre les enceintes 3, 4 et 1. L'ordre d'apparition des trois stimuli à égaliser était aléatoire. Chaque sous-session durait entre 5 et 10 minutes et le sujet était autorisé à se lever de la chaise entre chaque sous-session. La mentonnière et l'appui-tête étaient maintenus fixes pendant toute la durée du test afin de pouvoir repositionner minutieusement le sujet dans sa position d'origine au début de chaque sous-session.

Les sons étaient générés par une carte son RME Fireface 800 et restitués via des enceintes Amadeus PMX 4 alimentées par des amplificateurs Audac DPA154.

2.4 Session 2 : Casque

Les stimuli diffusés lors de la session 1 ont été enregistrés dans le but de les diffuser au casque. L'enregistrement s'est déroulé dans les conditions du test, avec une tête artificielle Neumann KU100 précisément positionnée à l'endroit de la tête du sujet (voir Figure 2). Ce protocole a été mis en place dans le but de comparer des sons comportant les mêmes paramètres physiques lors des deux sessions de l'expérience. Le casque utilisé pour la restitution était un Sennheiser HD650 (circum-aural ouvert). La tête artificielle était calibrée à l'aide d'un pistonphone Brüel & Kjær Type 4231 à 1 kHz, puis le niveau de sortie du système était calibré à son tour en posant le casque sur la tête artificielle.

Cette session se déroulait dans la même salle d'écoute que celle sur haut-parleurs. Le sujet était assis sur la même chaise, maintenue alors fixe pour toute la session et ne pointant pas vers un haut-parleur (la chaise était orientée



FIGURE 2 – Position de la tête artificielle (maintenue par l'appui-tête et la mentonnière) lors de l'enregistrement des stimuli.

entre les haut-parleurs 3 et 4). Le sujet réalisait les 12 égalisations de sonie correspondant aux trois égalisations de chacune des quatre positions de la partie précédente sur les références frontales. En plus de ces 12 égalisations, deux égalisations supplémentaires étaient réalisées. La référence de ces deux égalisations était le bruit synthétisé directement au casque (sans passer par une prise de son via la tête binaurale) en présentation diotique, et les sons égalisés sur cette référence étaient le même bruit, une fois en présentation diotique et l'autre en présentation dichotique, avec une ITD fixe de $772 \mu\text{s}$. Ces deux égalisations supplémentaires avaient pour but de révéler l'effet de l'ITD seule sur la sonie pour ce bruit filtré (les expériences précédentes concernant cet effet n'ayant utilisé que des sons purs).

Ces 14 égalisations constituaient une seule et même session qui durait approximativement 30 minutes. Les stimuli à égaliser apparaissaient dans un ordre aléatoire.

2.5 Sujets

20 sujets âgés de 20 à 25 ans ont été payés pour passer ce test. Leur seuil d'audition pour ce bruit filtré sur 1 ERB à 265 Hz était préalablement mesuré et devait être inférieur à 10 dB HL pour que le test se poursuive. Aucun d'entre eux n'avait d'expérience de test d'écoute en laboratoire. L'ordre dans lequel le sujet passait les deux sessions de l'expérience était tiré aléatoirement.

3 Résultats

Le PSE était évalué pour les sons positionnés sur le côté et pour les sons d'incidence frontale. Dans ce deuxième cas, le PSE n'était pas systématiquement nul (ce qui est

théoriquement le cas, puisque le stimulus à égaliser et la référence sont identiques). Cela témoigne de l'existence d'un certain bruit expérimental. Comparer les PSE à la valeur nominale 0 négligerait ce bruit.

Ainsi, les résultats ont été mis sous forme de différences de niveau pour sonie égale (LDEL, pour Level Difference required for Equal Loudness). La LDEL correspond ici à la différence entre le PSE du stimulus localisé à 0° (identique à la référence) et le PSE du stimulus localisé à $\pm 90^\circ$. Une LDEL de +2 dB indique alors que le stimulus latéral était perçu 2 dB plus fort que le stimulus frontal.

Tout d'abord, un test t a été réalisé sur la LDEL entre le bruit synthétisé directement au casque avec et sans ITD. Cette LDEL est significativement différente de 0 ($p = 0,016$) et est de l'ordre de 1 dB, confirmant l'effet de l'ITD sur la sonie déjà observé pour des sons purs.

Les LDEL obtenues ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées comprenant trois facteurs : position (4 niveaux), restitution (2 niveaux) et azimut (2 niveaux).

Un effet simple de la position a été révélé ($F(3, 57) = 22,771$; $p < 0,001$, hypothèse de sphéricité respectée). Cet effet est dû à des variations de pression aux oreilles de l'auditeur – la salle d'écoute n'étant pas anéchoïque – en fonction de sa position, mais ces variations sont identiques pour les deux modes de restitution puisque la tête artificielle était précisément positionnée à l'endroit de la tête des sujets. Un effet simple du mode de restitution a été révélé ($F(1, 19) = 4,613$; $p = 0,045$). Comme l'indique la Figure 3, les LDEL sont significativement plus élevées pour les stimuli restitués au casque (C) que sur haut-parleurs (H). L'interaction "position \times restitution" a eu un effet significatif sur les LDEL ($F(3, 57) = 2,937$; $p = 0,041$, hypothèse de sphéricité respectée). Un test post-hoc LSD de Fisher a été effectué, montrant une différence significative des LDEL obtenues au casque et sur haut-parleur uniquement dans les positions 3 ($p = 0,009$) et 4 ($p = 0,013$). Dans ces deux cas, les LDEL étaient plus élevées au casque que sur haut-parleurs (Figure 4).

L'influence du mode de restitution sur les LDEL a été examinée en fonction de l'azimut (-90° , noté L et 90° , noté R) des sons à égaliser dans les positions 3 et 4 (voir Figure 5). Dans chaque position et pour chaque azimut, les LDEL obtenues au casque étaient significativement plus élevées que celles obtenues sur haut-parleur. Ensuite, cette différence entre la LDEL obtenue au casque et la LDEL obtenue sur haut-parleur a été comparée pour chaque azimut dans les positions 3 et 4. Dans chacune de ces positions, le haut-parleur positionné à -90° et celui positionné à 90° étaient à deux distances différentes : L à 2 m et R à 1 m en position 3 ; L à 1 m et R à 2 m en position 4 (voir Figure 1). Un test t a été effectué sur les différences de LDEL selon le mode de restitution pour chaque azimut. Aucune différence significative n'a été révélée, ni dans la position 3 ($p = 0,067$), ni dans la position 4 ($p = 0,513$). Ainsi, dans ces deux positions, la LDEL dépend du mode de restitution, indépendamment de la distance de la source latérale.

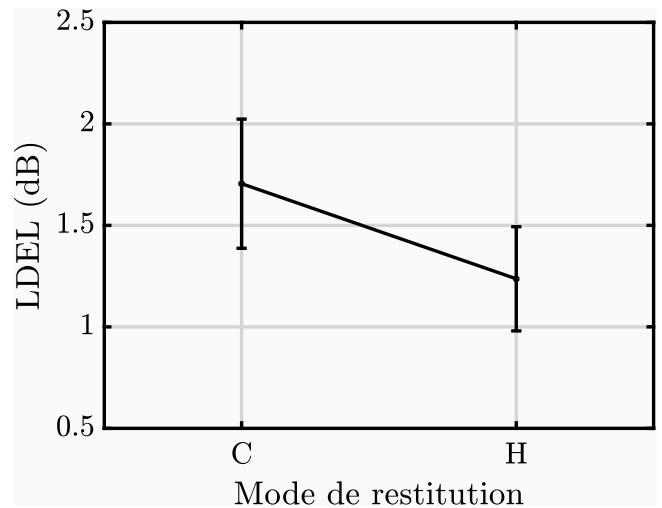


FIGURE 3 – LDEL en fonction du mode de restitution avec intervalles de confiance à 95%.

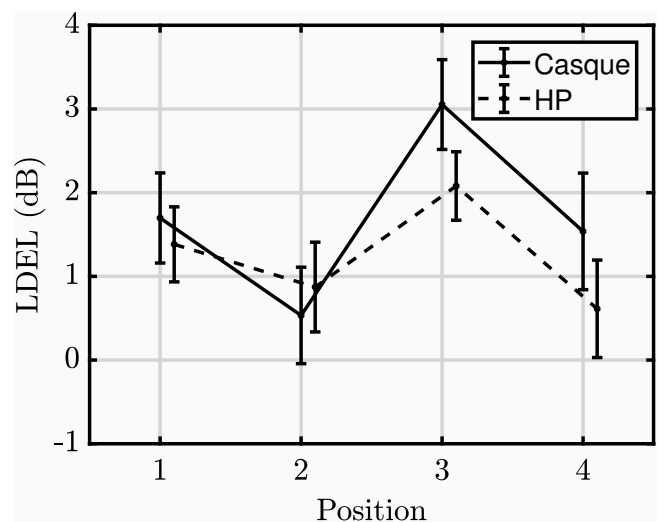


FIGURE 4 – LDEL pour chaque mode de restitution en fonction de la position avec intervalles de confiance à 95%.

4 Discussion

Une augmentation de sonie a été observée lorsqu'un bruit filtré à bande étroite était présenté au casque avec une ITD de $772 \mu s$. Ce résultat confirme l'effet de l'ITD sur la sonie de signaux sinusoïdaux basses fréquences révélé par de précédentes études [5, 10], lorsque la largeur de bande du signal est augmentée au sein d'une même bande critique. Ces résultats ont été obtenus au casque, dans des conditions dont la validité écologique est relativement faible. En effet, un son qui présente comme unique différence interaurale une ITD n'évoque pas la même sensation qu'un son qui provient d'une position latérale dans la nature. De plus, lorsque les sons sont naturellement perçus de manière frontale, leurs sources sont susceptibles d'être visuellement perceptibles et identifiables.

Lorsque la source du bruit était positionnée autour du sujet dans une pièce d'écoute, le phénomène de sonie directionnelle était significativement différent selon que le bruit était diffusé sur des haut-parleurs ou via un casque. Lorsque le sujet réalisait les égalisations de sonie pour les sons diffusés sur haut-parleurs, la source frontale était visible tout au long de la sous-session et le sujet avait

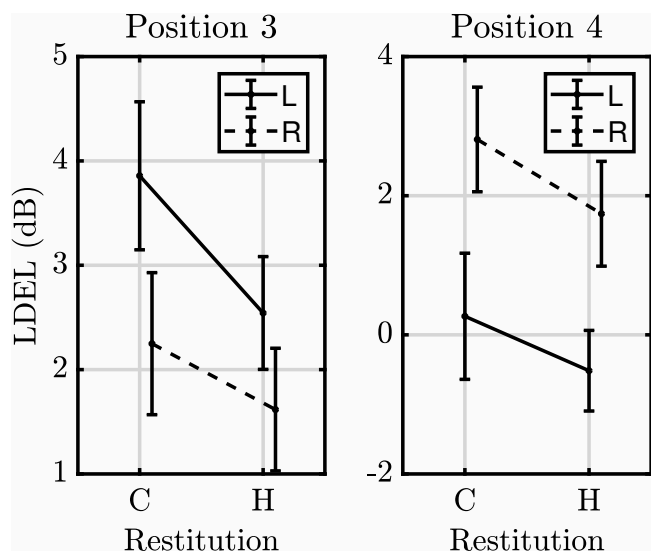


FIGURE 5 – LDEL en fonction du mode de restitution pour chaque azimut en position 3 et 4 avec intervalles de confiance à 95%.

connaissance de la position des deux sources latérales. Lorsqu'il effectuait les égalisations de sonie au casque, le sujet ne disposait d'aucune information visuelle liée aux stimuli sonore. La différence de LDEL selon le mode de restitution a été observée uniquement lorsque les sources frontales étaient situées à 1 m de l'auditeur, la plus faible distance étudiée. Les LDEL observées sur haut-parleurs étaient alors systématiquement inférieures à celles obtenues au casque.

Puisque la LDEL est la différence entre le PSE obtenu pour la source frontale et le PSE obtenu pour la source latérale, une diminution de LDEL peut être due soit à une augmentation du PSE de la source latérale, soit à une diminution du PSE de la source frontale. Dans le premier cas, le stimulus à égaliser provient d'une source latérale (qui n'est pas visible quel que soit le mode de restitution mais dont la position est connue par l'auditeur lors de la restitution sur haut-parleurs) et le stimulus de référence provient d'une source frontale (qui n'est pas visible lors de la restitution au casque et qui est visible lors de la restitution sur haut-parleurs). Dans le deuxième cas, le stimulus à égaliser et le stimulus de référence proviennent de la même source – la source frontale – et sont donc affectés de la même manière par les deux modes de restitution. Le mode de restitution est ainsi plus susceptible de faire varier les PSE des sources latérales que ceux des sources frontales.

Lorsque le PSE du stimulus émis par la source latérale augmente, cela signifie qu'elle a été perçue d'autant moins fort par rapport à la référence frontale. Cela peut être dû soit à une diminution de sonie de la source latérale, soit à une augmentation de sonie de la source frontale. La diminution de LDEL observée sur haut-parleurs était indépendante du fait que les sources latérales soient positionnées à 1 ou 2 m du sujet. Ce résultat suggère que la variation de la LDEL en fonction du mode de restitution est due à une variation de sonie de la source frontale.

Lors de la restitution sur haut-parleurs, le sujet avait conscience de la distance des haut-parleurs latéraux, puisqu'il les avait identifiés avant de s'installer sur la chaise. Pour autant, le fait qu'un haut-parleur latéral était situé à 1 ou 2 m n'a pas eu d'effet significatif sur la variation de

la LDEL entre les modes de restitution. Cette observation suggère que la connaissance de la distance de la source ne suffit pas à faire varier la sonie des stimuli qu'elle émet. En revanche, le fait que la source de référence – qui était frontale et donc visible lors de la présentation sur haut-parleurs – était positionnée à 1 ou 2 m de l'auditeur a eu un effet significatif sur la LDEL en fonction du mode de restitution. Selon cette hypothèse, la sonie évoquée par une source sonore augmente lorsque celle-ci est visible et proche, témoignant d'une interaction audio-visuelle [15].

5 Conclusion

Les résultats de cette expérience montrent que l'augmentation de sonie avec la latéralisation de la source de bruits à bande étroite en basse fréquence est plus importante lorsque les sons sont restitués au casque que via des haut-parleurs.

Cette observation semble s'expliquer par le fait qu'à niveau physique égal, la sonie des sons émis par les sources frontales est plus forte lorsqu'elles sont positionnées à 1 m du sujet que lorsqu'elles sont situées à 2 m de ce dernier, à condition que les sources sonores soient visibles. Cette condition était respectée exclusivement lorsque les sons étaient restitués via des haut-parleurs.

Le fait que le sujet connaisse ou non la distance à laquelle étaient placées les sources latérales n'a pas eu d'effet sur la différence de sensibilité directionnelle en sonie observée. Cela renforce l'hypothèse que l'augmentation de sonie pour les sources proches était due exclusivement aux indices visuels.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel de la formation "Image et Son Brest" de l'Université de Bretagne Occidentale ainsi que toutes les personnes ayant participé à cette étude.

Références

- [1] D. W. Robinson and L. S. Whittle, "The loudness of directional sound fields," *Acta Acust. united Ac.*, vol. 10, no. 2, pp. 74–80, 1960.
- [2] V. P. Sivonen and W. Ellermeier, "Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 5, pp. 2965–2980, 2006.
- [3] B. C. J. Moore, "Space perception," in *An Introduction to the Psychology of Hearing*, pp. 245–250, Leiden, Netherlands : BRILL, 2012.
- [4] B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, "Modeling binaural loudness," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 3, pp. 1604–1612, 2007.
- [5] V. Koehl and M. Paquier, "Loudness of low-frequency pure tones lateralized by interaural time differences," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 137, no. 2, pp. 1040–1043, 2015.

- [6] B. E. Mulligan, L. S. Goodman, D. P. Gleisner, and M. L. Faupel, "Steps in loudness summation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, no. 3, pp. 1141–1154, 1985.
- [7] G. F. Kuhn, "Model for the interaural time differences in the azimuthal plane," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62, no. 1, pp. 157–167, 1977.
- [8] P. Zahorik and F. L. Wightman, "Loudness constancy with varying sound source distance," *Nat. Neurosci.*, vol. 4, no. 1, pp. 78–83, 2001.
- [9] V. Koehl, M. Paquier, and E. Hendrickx, "Effects of interaural differences on the loudness of low-frequency pure tones," *Acta Acust. united Ac.*, vol. 101, no. 6, pp. 1168–1173, 2015.
- [10] G. Berthomieu, V. Koehl, and M. Paquier, "Influence of interaural time differences on loudness for low-frequency pure tones at varying signal and noise levels," in *Proc. Mtgs. Acoust.*, vol. 30, p. 050004, 2017.
- [11] H. Fletcher, "Minimum perceptible changes in frequency and sound pressure level," in *Speech and hearing in communication, 2nd ed*, pp. 144–152, Oxford, England : D. Van Nostrand, 1953.
- [12] M. Epstein and M. Florentine, "Binaural loudness summation for speech and tones presented via earphones and loudspeakers," *Ear Hear*, vol. 30, no. 2, pp. 234–237, 2009.
- [13] V. P. Sivonen, P. Minnaar, and W. Ellermeier, "Effect of direction on loudness in individual binaural synthesis," in *Proc. AES 118th Convention*, (Barcelona, Spain), May 2005.
- [14] E. H. A. Langendijk and A. W. Bronkhorst, "Fidelity of three-dimensional-sound reproduction using a virtual auditory display," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 1, pp. 528–537, 2000.
- [15] H. Fastl and M. Florentine, "Loudness in daily environments," in *Loudness*, pp. 199–221, New York, NY : Springer, 2011.
- [16] H. Levitt, "Transformed up-down methods in psychoacoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49, no. 2B, pp. 467–477, 1971.
- [17] B. R. Glasberg and B. C. J. Moore, "Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data," *Hear. Res.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 103–138, 1990.
- [18] B. A. Edmonds and J. F. Culling, "Interaural correlation and the binaural summation of loudness," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, no. 6, pp. 3865–3870, 2009.
- [19] ISO 226, "Acoustics – Normal equal-loudness-level contours," 2003.
- [20] ISO 3382-2, "Measurement of room acoustic parameters - Reverberation time in ordinary rooms," 2008.
- [21] IEC 60268-13, "Sound system equipment – Part 13 : Listening tests on loudspeakers," 1998.