

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Localisation sonore et capacité d'analyse spectrale de l'auditeur.

Guillaume Andéol<sup>1</sup>, Anne Guillaume<sup>1</sup>, Lionel Pellieux<sup>1</sup>, Sophie Savel<sup>2</sup> et Andrew Sabin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche Biomédicale des Armées, F-91223 Brétigny sur Orge, gandeol@imassa.fr

<sup>2</sup>Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, F-13402 Marseille cedex 20

<sup>3</sup>Northwestern University, Evanston, IL-60208, Etats Unis

La capacité à localiser une source sonore dans l'espace varie grandement d'un auditeur à l'autre, en particulier en ambiance bruyante. Cette variabilité pourrait être liée à des différences individuelles dans le traitement perceptif des indices acoustiques de localisation, et plus particulièrement au traitement des indices dits « spectraux », impliqués dans la perception de l'élévation d'une source sonore. Ces indices proviennent d'interactions entre la source sonore et la morphologie de l'auditeur, et concernent essentiellement la partie haute fréquence du spectre audible (>3-4 kHz). Or, la variabilité inter-individuelle de la résolution spectrale dans cette région fréquentielle est élevée. Nous proposons de tester l'hypothèse selon laquelle les différences individuelles en résolution spectrale pourraient partiellement expliquer celles observées en localisation sonore dans le bruit. Nous avons mesuré la résolution spectrale de 19 participants via 2 tests : le « spectral modulation detection » et le « ripple reversal ». Ensuite ces participants ont réalisé des séances de localisation sonore pour différents rapports signal sur bruit. Les données ainsi recueillies montrent une corrélation significative entre capacité de résolution spectrale et capacité de localisation.

## 1 Introduction

La technologie de spatialisation des sons (son 3D) vise à recréer un espace sonore virtuel dans un casque stéréophonique. Concrètement, le son 3D restitue les indices acoustiques de localisation utilisés par notre système auditif pour localiser un son dans l'espace. Cette technologie est en cours d'introduction au sein des interfaces homme/système notamment en aéronautique de défense (cockpits d'avions et d'hélicoptères, contrôle aérien). En effet, le son 3D pourrait y augmenter la sécurité de l'opérateur en facilitant l'intelligibilité des communications radio et la détection-interprétation des alarmes, tout en épargnant la charge cognitive grâce à l'intuitivité de la perception auditive.

Cependant, la capacité à localiser un son dans l'espace varie grandement d'un auditeur à l'autre, en particulier en environnement bruyant [1] or c'est dans cette catégorie d'environnement que le son 3D a vocation à être utilisé. L'exploration de l'origine de cette variabilité inter individuelle pourrait fournir des pistes pour la réduire, notamment via un apprentissage spécifique.

Certains auteurs ont suggéré que la variabilité inter individuelle en localisation pourrait être liée au traitement perceptif des indices acoustiques de localisation, plus particulièrement les indices dits « spectraux », impliqués dans la localisation d'une source sonore dans la dimension haut/bas et avant/arrière [2], la dimension droite/gauche étant codée par les indices binauraux (différence interaurale en temps et en intensité). Ces indices spectraux proviennent des phénomènes de diffraction produits par le relief anatomique de l'auditeur, essentiellement la partie supérieure du corps. Torse, tête et oreilles externes agissent comme un filtre spectral créant des pics et des vallées dans le profil spectral de l'onde sonore incidente, selon un pattern particulier dépendant de la direction de la source sonore. La reconnaissance par le système auditif de ce pattern permet à l'auditeur de localiser la source. Du fait de

leur taille, les reliefs anatomiques n'interagissent qu'avec la région haute fréquence du spectre (au-delà de 3-4 kHz), ainsi les indices spectraux ne sont présents qu'à ces fréquences. Or la sensibilité au profil spectral peut varier de manière importante d'un individu à l'autre, en particulier pour les hautes fréquences. De plus les indices spectraux sont particulièrement sensibles à une dégradation du rapport signal sur bruit [3]. Nous proposons de tester l'hypothèse d'un lien la sensibilité au profil spectral et la variabilité inter-individuelle en localisation sonore dans le bruit.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Participants

Dix neuf personnes, 9 femmes et 10 hommes, ont participé à cette étude. L'âge moyen était de 31 +/- 8 ans). Aucun d'entre eux ne possédait d'antécédent audiolgique et leurs seuils auditifs étaient inférieurs à 20 dB HL pour les fréquences comprises entre 0,125 et 8kHz (0,125, 0,250, 0,500, 1, 2, 3, 4, 6, et 8 kHz).

### 2.2 Dispositifs expérimentaux pour la localisation sonore dans le bruit

La tâche de localisation a été conduite en chambre semi anéchoïque dans laquelle un cube de 2,92 m de côté a été mis en place. Huit haut-parleurs ont été installés à chaque sommet du cube. La tête du sujet était positionnée au centre du cube grâce à un siège à la hauteur ajustable. Il était demandé au sujet de regarder droit devant elle/lui en gardant la tête droite. Une caméra vidéo autorisait un contrôle permanent de la position de la tête à la fois par l'expérimentateur et par le sujet (grâce à un écran placé devant le sujet). Les haut-parleurs étaient visibles. Tous les stimuli sonores ont été générés et contrôlés en utilisant un processeur TDT system III.

Le signal était un bruit rose (0,3-9 kHz), 55 dB SPL, émis par un des 8 haut-parleurs. Le masque était un bruit rose (0.125-15 kHz) dont le niveau variait entre 50 et 62.5 dB SPL par pas de 2,5 dB. Il était présenté en champ diffus produit par les 8 haut-parleurs. Le signal (200 ms) était temporellement centré dans le masque (500 ms).



Figure 1 : Photographie de la « noix de coco », dispositif ovoïde à 8 boutons, chaque bouton désignant un haut-parleur.

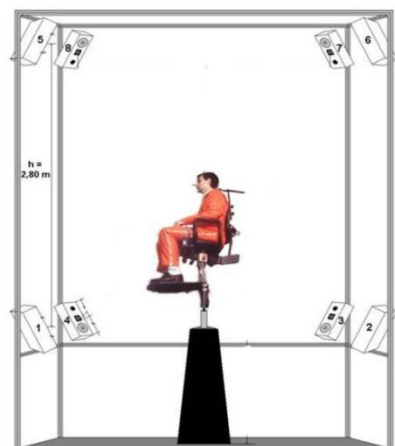


Figure 2 : Emplacement du participant et des 8 haut-parleurs à l'intérieur de la chambre anéchoïque

### 2.3 Protocole de localisation dans le bruit

Les auditeurs effectuaient une tâche d'identification de haut-parleurs à choix forcé. A chaque essai, le signal était émis par un des 8 haut-parleurs, le sujet devait indiquer lequel via le dispositif de la figure 1. Le sujet n'avait pas de retour sur la justesse de sa réponse. Il effectuait cette tâche dans 7 conditions d'ambiance sonore : le silence, et 6 niveaux de bruit : 50 à 62,5 dB SPL ce qui correspondait à un rapport signal sur bruit (signal to noise ratio, snr) de +5 à -7,5 avec un pas de 2,5. Le haut-parleur qui émettait le signal ainsi que l'ambiance sonore (silence ou bruit) variaient aléatoirement d'un essai à l'autre. Au cours d'une session expérimentale, chaque sujet effectuait 5 réponses par haut-parleur (8) et par condition d'ambiance sonore (7) soit  $5 \times 8 \times 7 = 280$  essais. Chaque sujet effectuait 4 sessions dont une session d'entraînement exclue des analyses. Les données recueillies étaient le pourcentage d'identifications correctes de haut-parleurs, moyenné sur les 8 haut-parleurs, pour chaque ambiance sonore.

### 2.4 Mesure de la sensibilité au profil spectral

Deux tests ont été utilisés pour quantifier la sensibilité des participants au profil spectral : le « ripple reversal » [4-5] et le « spectral modulation detection » [6]. Ces 2 tests

emploient des stimuli similaires : stimuli dont le spectre en fréquence subit une modulation sinusoïdale. Les pics et vallées du spectre sont répartis régulièrement sur une échelle fréquentielle logarithmique. Il est possible de faire varier la profondeur de modulation (différence d'amplitude pic/vallée), la fréquence de modulation (cycle(s) par octave c/o) et la phase de la modulation. Les stimuli employés duraient 150 ms pour le « spectral modulation detection » et 500 ms pour le « ripple reversal ». Ils étaient présentés à un niveau de 35 dB SPL Spectrum Level +/- 16 dB de roving, la phase de la modulation était aléatoire.

#### 2.4.1 Test « spectral modulation detection »

Ce test consiste à évaluer le « seuil de discrimination de modulation spectrale », il s'agit de la profondeur d'amplitude minimale (en dB) pour discriminer un stimulus à modulation spectrale (le signal) d'un stimulus à spectre plat (le standard) (figure 3). Ce seuil a été calculé pour plusieurs catégories de stimuli, qui différaient selon leur bande de fréquence (4-16 kHz et 0,2-12,8 kHz) et leur fréquence de modulation (0,75 ; 1,5 et 3 c/o pour les stimuli de bande de fréquence 4-16 kHz et : 0,5 ; 1 et 4 c/o pour les stimuli de bande de fréquence 0,2-12,8 kHz), soit 6 catégories de stimuli.

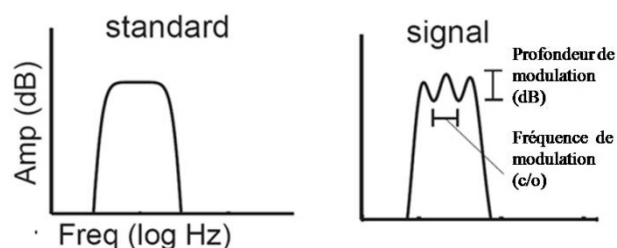


Figure 3 : Schéma du spectre des stimuli standard et signal employés dans le test « spectral modulation detection ».

#### 2.4.2 Test « ripple reversal »

Ce test permet d'estimer la sensibilité au profil spectral en déterminant la capacité de l'auditeur à discriminer deux stimuli (standard et cible) ayant la même modulation spectrale, la même profondeur de modulation mais dont les phases de modulation sont opposées de telle manière que l'emplacement des pics d'un stimulus correspond à l'emplacement des vallées de l'autre stimulus. Au cours du test, la fréquence de modulation spectrale variait en vue de déterminer la fréquence de modulation maximale, ou « seuil d'inversion de phase ». Une seule catégorie de stimuli a été utilisée : leur bande de fréquence étaient 0,1-5 kHz et leur profondeur de modulation étaient de 30 dB[5].

#### 2.4.3 Protocole

Le protocole des deux tests était identique. Avant le recueil des données, les sujets étaient exposés passivement aux stimuli pour les familiariser. Ensuite, ils effectuaient une séance d'entraînement où ils devaient répondre correctement à 5 essais consécutifs pour débiter le recueil effectif des données.

Chaque essai était composé de trois intervalles d'observation. Deux intervalles contenaient le standard et un intervalle contenait le signal. La tâche était un choix

forcé à 3 intervalles avec feedback, le sujet devant indiquer l'intervalle comportant le signal en cliquant sur un écran à l'aide d'une souris. Les seuils étaient estimés à l'aide d'une procédure adaptative « 3-down, 1-up » à 60 essais. Trois mesures de seuil étaient calculées avant de changer de type de stimuli. La valeur retenue pour les analyses était la moyenne de ces 3 seuils.

### 3 Résultats

Une régression non linéaire a été conduite sur les performances de localisation (pourcentage d'identifications correctes de haut-parleurs) en fonction du niveau du bruit masquant, en utilisant une fonction logistique à 3 paramètres d'équation (1) pour construire une fonction psychométrique [7].

$$y = a / \left( 1 + \left( \frac{x}{x_0} \right)^b \right) \quad (1)$$

L'axe des y correspondait au pourcentage d'identifications correctes des haut-parleurs et l'axe des x correspondait au niveau du bruit masquant. « a » désignait la valeur maximal de la courbe (proche de la performance maximale du sujet),  $x_0$  correspondait à la valeur de x (niveau de bruit) conduisant à une diminution de moitié de la performance maximale (« a »), « b » correspondait au « facteur pente ». Cette équation permettait de déterminer un « seuil de localisation dans le bruit » défini comme le niveau de bruit induisant une performance à mi chemin entre la performance maximale théorique (100%) et la chance (12,5%) soit 56,25%.

La table 1 montre la performance moyenne pour le seuil de localisation dans le bruit, le seuil de détection de modulation spectrale et le seuil d'inversion de phase ainsi que le numéro des sujets dont les performances sont éloignées de plus de deux écart types de la moyenne (« outlier ») et par conséquent exclues du calcul des corrélations.

|                                                                 |                 |          | Moyenne<br>(écart type) | Outlier       |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|----------|-------------------------|---------------|
| Seuil de localisation dans le bruit<br>(dB SPL)                 |                 |          | 59,55(1,89)             | Sans          |
| Seuil de<br>détection de<br>modulation<br>spectrale (dB<br>SPL) | 0,2-<br>12,8kHz | 0,5 c/o  | 12,38(3,38)             | S11           |
|                                                                 |                 | 1 c/o    | 8,26(2,89)              | S11 et<br>S19 |
|                                                                 |                 | 4 c/o    | 8,03(3,76)              | S16           |
|                                                                 | 4-16<br>kHz     | 0,75 c/o | 10,80(2,56)             | Sans          |
|                                                                 |                 | 1,5 c/o  | 9,55(3,30)              | S15           |
|                                                                 |                 | 3 c/o    | 6,13(2,72)              | S16           |
| Seuil d'inversion de phase (c/o)                                |                 |          | 4,46(1,37)              | Sans          |

Table 1 : Performances moyennes (écart-type) réalisées au seuil de localisation dans le bruit, aux différents tests de sensibilité au profil spectral et « outlier » (sujet dont la performance est au-delà de 2 écart-types de la moyenne).

Aucune corrélation n'a été observée entre le seuil d'inversion de phase et le seuil de localisation, néanmoins plusieurs corrélations négatives significatives ont été observées entre le seuil de localisation dans le bruit et le seuil de détection de modulation spectrale pour certains stimuli. En effet, pour les stimuli de bande de fréquence 4-16kHz et de fréquence de modulation 0,75 et 1,5 c/o; la performance de localisation s'améliorait avec la diminution

du seuil de détection de modulation spectrale (figure 4 et 5). Ainsi, les auditeurs ayant un seuil de détection de modulation spectrale bas (c'est-à-dire meilleur), localisent mieux que les auditeurs ayant un seuil plus élevé (fréquence de modulation 0,75 c/o : N=19  $r = -0,60$   $p < 0,01$  ; fréquence de modulation 1,5 c/o : N=18  $r = -0,65$   $p < 0,01$ ).

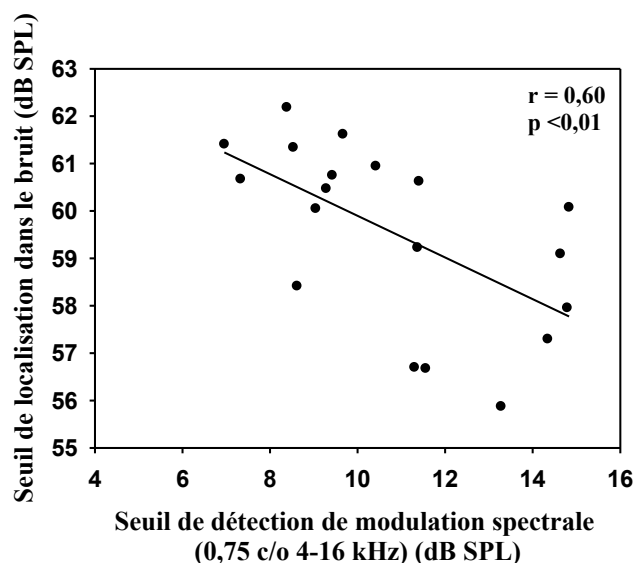


Figure 4 : Seuil de localisation sonore dans le bruit en fonction du seuil de détection de modulation spectrale pour un stimulus de bande de fréquence 4-16 kHz et de modulation spectrale 0,75 c/o.

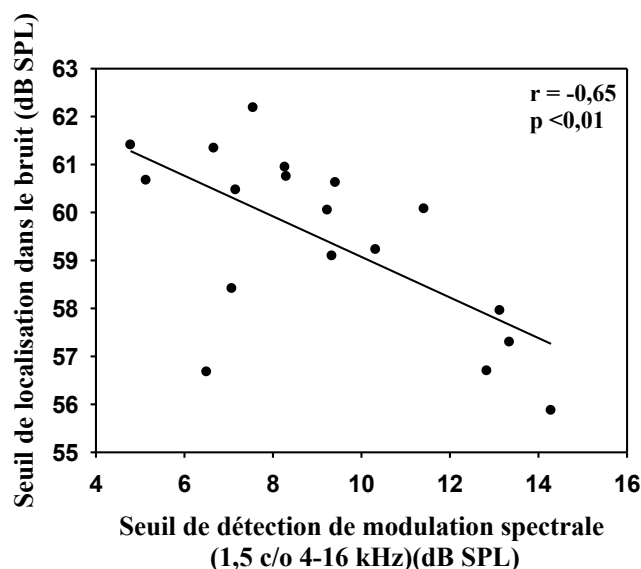


Figure 5 : « Seuil de localisation sonore dans le bruit » en fonction du seuil de détection de modulation spectrale pour un stimulus de bande de fréquence 4-16 kHz et de modulation spectrale 1,5c/o.

## 4 Discussion

Nos résultats sont en faveur d'un rôle de la sensibilité au profil spectral dans la variabilité inter-individuelle en localisation sonore dans le bruit. Ainsi, la performance de localisation apparaît être corrélée à la capacité à détecter des modulations spectrales de fréquences de modulation basses (0,75 et 1,5 c/o) mais non haute (3 c/o) au sein de stimuli hautes fréquences (4-16 kHz). D'abord, ces résultats sont cohérents avec l'emplacement des indices spectraux de localisation sur l'axe fréquentiel du spectre audible (au-delà de 4kHz). Ensuite, ils peuvent être rapprochés d'une hypothèse proposée récemment, selon laquelle l'analyse spectrale opérée par le système auditif, serait similaire à celle opérée par le système visuel [8]: le spectre d'un stimulus serait perçu comme une somme de composants variant selon leur fréquence de modulation spectrale, et traités par des canaux perceptifs spécifiques d'une fréquence de modulation donnée. Or, d'après Macpherson et Middlebrooks [9], les indices spectraux de localisation seraient codés par des fréquences de modulation comprises entre 0,5 et 2 c/o. Leurs résultats concordent avec le fait que pour les stimuli de bande de fréquence 4-16kHz, nous n'observons de corrélations significatives que pour les fréquences de modulation 0,75 et 1,5 c/o. Ainsi, la relation entre performance de localisation et seuil de détection de modulation spectrale pourrait être spécifique aux fréquences de modulation des indices spectraux et non pas sous tendue par une sensibilité globale aux modulations spectrales.

## 5 Conclusion

Pouvoir détecter des modulations spectrales basses semble être un facteur limitant la localisation sonore dans le bruit. La détection des modulations spectrales étant sensible à l'entraînement, il pourrait être possible d'améliorer les performances des auditeurs via un entraînement spécifique.

## Références

- [1] Best V., "Auditory spatial perception with sources overlapping in frequency and time" *Acta Acustica united with Acustica*, 91(3),421-428 (2005)
- [2] Wightman F.L., Kistler D.J. "Resolution of front-back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement". *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (5), 841-53 (1999).
- [3] Good M.D., Gilkey R.H. "Sound localization in noise : The effect of signal-to-noise ratio" *J. Acoust. Soc. Am.* 99(2), 1108-1117 (1996).
- [4] Supin A.Y., Popov V.V., Milekhina, O.N., Tarakanov M.B. "Frequency resolving power measured by rippled noise" *Hear. Res.* 78(1), 31-40 (1994)
- [5] Henry B.A., Turner C.W., Behrens A. "Spectral peak resolution and speech recognition in quiet : Normal hearing, hearing impaired, and cochlear implant listeners" *J. Acoust. Soc. Am.* 118(2), 1111-1121 (2005).
- [6] Eddins D.A., Bero E.M. "Spectral modulation detection as a function of modulation frequency, carrier bandwidth, and carrier frequency region" *J. Acoust. Soc. Am.* 121(1), 363-372 (2006).
- [7] Moore D.R., Hine J.E., Jiang Z.D., Matsuda H., Parsons C.H., King A.J. "Conductive hearing loss produces a reversible binaural hearing impairment" *Journal of Neuroscience* 19(19), 8704-8711 (1999).
- [8] Shamma S.A., Versnel H., Kowalski N. "Ripple analysis in ferret primary auditory cortex.I Response characteristics of single unit to sinusoidally rippled spectra" *Aud. Neurosci.* 1(1), 233-254 (1995).
- [9] Macpherson E.A., Middlebrooks J.C. "Vertical-plane sound localization probd with ripple-spectrum noise" *J. Acoust. Soc. Am.* 114(1), 430-445 (2003).