HAL
open science

Différences inter-individuelles en latéralisation de sons basse fréquence

Sophie Savel

To cite this version:

Sophie Savel. Différences inter-individuelles en latéralisation de sons basse fréquence. Actes du 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, CD-ROM (6 pages), Apr 2010, Lyon, France. hal-00550543

HAL Id: hal-00550543

https://hal.science/hal-00550543v1

Submitted on 28 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

10ème Congrès Français d'Acoustique
Lyon, 12-16 Avril 2010

Différences inter-individuelles en latéralisation de sons basse fréquence

Sophie Savel[1],

[1] Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS UPR 7051, Equipe Psychoacoustique,
31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France.

La plupart des études sur la localisation auditive en champ libre ou la latéralisation au casque a été menée sur un très faible effectif d'auditeurs, surentraînés à la tâche. Nous avons récemment décelé d'importantes différences entre 50 individus naïfs dans la capacité à localiser un son basse fréquence en champ libre, et identifié un lien entre sexe ou latéralité manuelle et asymétrie gauche/droite de cette capacité (Savel, 2009, Hearing Research). Dans l'étude présentée, nous avons mesuré sur 33 sujets naïfs la capacité de latéralisation au casque d'un signal basse fréquence dont on manipulait le décalage interaural de phase. Les sujets participaient à 5 sessions journalières. Nous avons observé une importante variabilité inter-individuelle au premier jour, où les seuils individuels variaient de 5 à 33°. D'après une conversion logarithmique des seuils aux cinq jours et une modélisation exponentielle de ces seuils, nous avons pu déterminer que (1) l'apprentissage a généralement eu pour effet de diminuer le seuil initial par deux, et (2) la majorité des sujets avait atteint son seuil asymptotique avant le cinquième jour. La variabilité inter-individuelle était aussi importante dans les seuils asymptotiques (qui variaient de 2 à 19°) que dans les seuils initiaux, ce qui suggère que l'apprentissage ne suffit pas à gommer les différences entre individus. Le fait que 60% des 33 seuils asymptotiques mesurés soient supérieurs au seuil de 3° typiquement rapporté dans la littérature sur peu de sujets experts indique qu'une étude de latéralisation doit privilégier la taille de l'échantillon et diminuer de temps d'apprentissage. Enfin, nous avons observé sur 7 hommes droitiers le même avantage du côté gauche que celui observé précédemment en champ libre, ce que nous interprétons comme l'influence du sexe et de la latéralité manuelle sur la spécialisation de l'hémisphère cérébral droit dans l'audition spatialisée.

1 Introduction

Une ressource importante des systèmes sensoriels est la capacité à encoder la position spatiale des stimuli. Pour le système auditif humain, cette capacité est essentiellement basée sur 3 types d'indices : les différences interaurales de temps (DIT) ou de phase (DIP), les différences interaurales d'intensité (DII), et les indices monauraux spectraux. L'ensemble de ces indices est appelé «fonctions de transfert de la tête» («HRTF» en anglais).

De nombreux travaux psychoacoustiques [1, 2, 3] ont mesuré la performance de localisation auditive au moyen de l'ensemble de ces indices, principalement en champ libre. Dans ces études, la source sonore à localiser était soit réelle (présentée sur un haut-parleur parmi *n* dispersés autour de l'auditeur dans le plan horizontal et/ou vertical) soit virtuelle (présentée au casque avec un filtrage simulant la transformation du son initial par le jeu des HRTFs). Il a été établi que (1) la résolution gauche/droite est excellente, (2) la résolution de la position angulaire dans le plan horizontal est également remarquable, mais plus fine dans le plan médian que vers l'axe interaural, (3) la résolution avant/arrière et haut/bas est moins précise et n'est possible que si des indices monauraux spectraux sont disponibles, (4) la performance globale est moins bonne avec des sources virtuelles que réelles, et (5) cette dégradation en mode virtuel est encore plus drastique si le signal est filtré avec des HRTFs «génériques» plutôt qu'avec les HRTFs personnalisés de l'auditeur.

D'autres études se sont intéressées à mesurer la plus petite valeur de DIT ou de DII que doit avoir un stimulus pour permettre une latéralisation (i.e., une décision gauche/droite) exacte [4, 5, 6, 7, 8]. Dans ces études de «latéralisation», le son est présenté au casque avec une certaine DIT ou DII, et l'image sonore perçue est intracrânienne. Les résultats de ces études ont unanimement révélé que la résolution des DIT est remarquablement fine : les seuils de latéralisation rapportés correspondent à un décalage interaural de 10 µs (3° si c'est le retard de phase qui est considéré).

L'inconvénient des ces études est d'avoir impliqué un nombre très faible d'auditeurs (<20 en localisation, souvent 2–4 en latéralisation), jeunes (20–30 ans), et généralement très expérimentés dans la tâche (jusqu'à 100 heures). Le degré de variabilité inter-individuelle existant en localisation auditive reste alors inconnu, alors qu'il semble évident que cette variabilité doit être considérable, étant donné que les différences morphologiques entre individus vont créer des différences de HRTFs importantes.

Dans une étude récente, nous avons donc évalué cette variabilité inter-individuelle en localisation de sources réelles, sur 50 auditeurs naïfs d'âges variés [9]. Nous avons observé que la variabilité (1) est importante dans la résolution de la position angulaire de la source, (2) est aussi considérable dans la dépendance de cette résolution à l'angle de la source, (3) est indépendante de l'âge, et (4) n'est pas diminuée par un entraînement de plusieurs heures. De plus, nous avons observé que 30% des auditeurs avaient une performance significativement plus fine si la source était présentée sur leur gauche que si elle était présentée sur leur droite. Cette asymétrie en faveur de la gauche a été surtout observée chez les hommes droitiers, ce que nous avons interprété par le lien entre spécialisations cérébrales hémisphériques et sexe ou latéralité manuelle.

Dans l'étude présentée ici, nous proposons de quantifier la variabilité inter-individuelle dans une tâche de latéralisation au casque, en manipulant les DIT.

2 Méthode

2.1 Sujets

33 auditeurs normo-entendants (23 hommes, 10 femmes) âgés de 23 à 57 ans ont participé à l'étude. Tous étaient naïfs en latéralisation au casque, mais 11 avaient participé à l'étude antérieure sur la localisation en champ libre. Tous sauf 2 étaient droitiers.

2.2 Design et stimuli

Les stimuli étaient calculés digitalement à un taux de 50 kHz (TDT system 3) et convertis en analogique au moyen de 2 convertisseurs. La sortie de chaque convertisseur était atténuée (TDT PA5) et envoyée à chaque canal (gauche ou droite) d'un amplificateur puis au casque d'écoute (Sennheiser HD250).

Le signal était une sinusoïde non modulée de 400 Hz d'une durée de 100 ms (temps de montée/descente = 20 ms) et d'un niveau de 65 dB SPL. La valeur de DIT désirée était appliquée en retardant la phase de départ du signal sur une oreille par rapport à l'autre. En revanche les signaux étaient temporellement synchrones, ce qui signifie qu'on manipulait les différences de temps/phase sur la partie centrale du signal et non pas les différences de temps d'arrivée des enveloppes. Les auditeurs étaient placés en cabine audiométrique à double niveau d'isolation phonique.

2.3 Procédure

Les seuils de DIT ont été obtenus avec une procédure adaptative à choix forcé binaire, avec un critère 3-down/1-up qui estime le point à 79.4% de réponses correctes sur la fonction psychométrique [10]. A chaque essai, une paire de signaux de 400 Hz (avec un silence de 75 ms entre les 2 sons de la paire) était présentée en binaural, dans chacun de 2 intervalles d'observation. Dans un intervalle, les 2 sons de la paire étaient présentés avec une DIT de 0 µs (référence + référence). Dans l'autre intervalle, choisi aléatoirement à chaque essai, le premier son de la paire était présenté avec une DIT de 0 µs mais le second était présenté avec la DIT voulue (référence + son test). L'auditeur devait indiquer quel intervalle d'observation contenait le son test, en pressant 1 bouton parmi 2. Il recevait un feedback visuel après chaque réponse.

La DIT de départ du son test était approximativement 3 pas au-dessus du seuil attendu. Les pas de variation de la DIT dans la procédure adaptative étaient des facteurs multiplicatifs de $10^{-\alpha}$ après 3 réponses correctes, et 10^{α} après 1 réponse incorrecte. La valeur de α était initialement 0,2 mais était réduite à 0,05 après la seconde inversion. Une mesure de seuil était constituée de 10 inversions. La valeur de ce seuil était la moyenne géométrique de la DIT aux 8 dernières inversions. En moyenne, 50 essais et 6,5 minutes étaient nécessaires pour achever une mesure de seuil. Une mesure était ignorée et remplacée par une nouvelle si l'écart-type géométrique de la DIT aux 8 dernières inversions était supérieur ou égal à $10^{3\alpha}$.

2.4 Organisation de l'expérience

Une fois l'audiométrie clinique, l'âge et la latéralité manuelle [11] de chaque personne déterminés, l'auditeur commençait par une procédure de familiarisation à la tâche.

Dans un premier temps, on s'assurait que le son binaural de référence (DIT = 0 µs), présenté à l'auditeur en boucle, était bien perçu au centre de la tête. Dans le cas contraire, l'auditeur maniait un potentiomètre de manière à atténuer l'intensité sur un des 2 écouteurs du casque jusqu'à ce que le son soit enfin perçu centré. Cette procédure de balance acoustique est habituelle en latéralisation [12], elle permet d'éviter des différences d'intensité liées à des inégalités interaurales d'audiométrie, à des asymétries morphologiques, ou à l'inadéquation de l'étalonnage du casque pour l'auditeur concerné. Seuls 20% des 33 auditeurs ont eu besoin d'ajouter une atténuation supérieure à 2 dB pour centrer le son de référence. L'atténuation nécessaire pour eux (3–4 dB) reste toutefois inférieure au seuil de DII d'auditeurs naïfs rapporté dans la littérature pour des signaux similaires [13], ce qui signifie que cette procédure de balance acoustique n'a pas parasité les mesures de DIT avec des DII non désirées détectables.

Dans un second temps, on familiarisait l'auditeur avec la tâche de latéralisation, en lui présentant le son test avec une DIT initiale de 300 µs. L'auditeur devait confirmer que ce son produisait une image sonore largement latéralisée, conforme à l'image intracrânienne attendue par la manipulation de la DIT (gauche ou droite). Si oui, l'auditeur complétait 10 essais adaptatifs pour se familiariser au test. Si non, on l'encourageait à répondre au hasard jusqu'à ce que la DIT augmente suffisamment pour produire une latéralisation correcte. Une limite maximum de 630 µs (DIP = 90°) était imposée. Si une fois cette limite atteinte l'auditeur ne percevait toujours pas de son latéralisé, sa participation à l'étude était annulée.

Ensuite, les 33 auditeurs retenus ont participé à 5 sessions quotidiennes sur une semaine. 4 sujets ont complété 4 sessions additionnelles après le weekend. Chaque session commençait par la procédure de balance acoustique, à partir de laquelle on déterminait le niveau sur chaque écouteur pour maintenir une intensité moyenne de 65 dB SPL. Ensuite, l'auditeur complétait 3 mesures de seuil de latéralisation avec la DIT favorisant l'oreille gauche ou droite, faisait une pause, puis complétait 3 nouvelles mesures avec la DIT favorisant l'autre oreille.

Les auditeurs étaient encouragés à être dans le «top 5» des meilleurs seuils afin de les pousser à atteindre leur performance maximale. Par convention, les seuils obtenus au jour 1 sont considérés ci-dessous comme les seuils «initiaux», et ceux obtenus au jour 5 comme les seuils «asymptotiques».

2.5 Analyses des données

Le seuil de DIT journalier d'un auditeur donné a été défini comme la moyenne géométrique des 6 seuils collectés au jour considéré (3 si l'oreille favorisée était prise en compte). La variabilité intra-individuelle a été déterminée par l'écart-type géométrique de ces 6 seuils. Le seuil moyen journalier du groupe entier a été calculé avec la moyenne géométrique des 33 seuils individuels. La loi de dispersion de ces seuils a été examinée sur les 5 jours en évaluant les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement (Skewness et Kurtosis), et en comparant les données à une distribution théorique normale avec un test de χ^2. Sur les 10

distributions (5 jours * 2 oreilles favorisées par la DIT) de 33 seuils examinées, aucune ne suit une loi normale (Skewness et Kurtosis > 1 ; $\chi^2 > 3.8$, $p < .04$). De ce fait, toutes les analyses statistiques décrites ci-dessous ont été réalisées sur une transformation logarithmique des seuils en 10log(DIT) *ref* 1 µs [14].

Les comparaisons intra-sujet oreille gauche *vs* oreille droite et jour par jour sur les seuils de DIT ont été menées avec une analyse de variance non paramétrique : Test *H* de Kruskal-Wallis.

Les comparaisons inter-sujet (oreille favorisée, jour, sexe) ont été réalisées avec une analyse de variance paramétrique pour mesures répétées et un test post-hoc Tukey HSD.

Le but de faire passer 5 sessions journalières aux auditeurs était d'observer un effet d'apprentissage. Pour quantifier cet apprentissage, la transformation logarithmique du seuil au jour 5 a été soustraite à celle du seuil au jour 1. Par exemple, une différence de 3 correspond à une diminution du seuil par 2 (à un doublement de performance). Nous avons considéré que l'apprentissage d'un auditeur était significatif si le test de Kruskal-Wallis indiquait une diminution significative du seuil au gré des jours.

Le décours temporel de l'apprentissage, la quantité d'apprentissage et le seuil asymptotique de chaque auditeur ont été modélisés ainsi : à la courbe des seuils en fonction du jour a été appliquée une fonction exponentielle décroissante de la forme indiquée en Equation 1,

$$N(t) = Ae^{\frac{t}{\tau}} \qquad (1)$$

où *N(t)* est le seuil (en 10log(DIT) *ref* 1 µs) à la session *t*, *A* est le seuil asymptotique «prédit» (i.e., à $t = +\infty$), et τ est une constante de temps. La corrélation entre les points expérimentaux et le modèle a été évaluée par un coefficient de détermination (r^2).

Les relations entre l'âge et (1) les seuils initiaux, (2) le décours temporel de l'apprentissage, (3) la quantité d'apprentissage et (4) les seuils asymptotiques ont été déterminées avec un coefficient de corrélation de Pearson (*R*), dont la significativité a été vérifiée avec un test *t*.

3 Résultats

3.1 Variabilité intra-individuelle

Comme indiqué plus haut, la DIT variait par pas multiplicatifs de 10^{α}, avec $\alpha = 0{,}05$. Chaque jour, l'auditeur complétait 6 mesures de seuil et on évaluait la moyenne et l'écart-type géométriques de ces 6 seuils. Pour la majorité des 165 valeurs individuelles examinées (33 auditeurs * 5 sessions), la variabilité intra-individuelle est de taille considérable (écart-type géométrique variant de $10^{2,3\alpha}$ à $10^{2,7\alpha}$), mais indépendante du jour ($p = .20$), du sexe ($p = .36$) ou de l'âge (pour les 5 jours, $R < .22$, $p > .24$).

3.2 Oreille gauche *vs* oreille droite

Une analyse de variance paramétrique des seuils par oreille favorisée (gauche, droite), jour de passation (5) et sexe (23 hommes, 10 femmes) n'a pas révélé d'effet du sexe ($p = .82$) ou de l'oreille favorisée ($p = .81$), mais une interaction significative entre ces 2 facteurs ($F_{1,31} = 7.4$, $p = .01$) : indépendamment du jour, les seuils des hommes sont significativement plus petits si la DIT favorisait l'oreille gauche que si elle favorisait l'oreille droite ($p = .04$), tandis que les seuils des femmes ne montrent aucune asymétrie ($p = .46$).

L'analyse intra-sujet des différences gauche/droite par un test de Kruskal-Wallis a confirmé que 7 hommes ont des seuils significativement plus petits quand la DIT favorisait l'oreille gauche, quel que soit le jour ($H > 4.1$, $p < .04$).

Rappelons que 11 des 33 auditeurs avaient participé au préalable à une étude de localisation en champ libre. Pour 78% d'entre eux, le même pattern (i.e., gauche meilleure que droite, droite meilleure que gauche, ou pas d'asymétrie) a été observé dans l'étude préalable (localisation) et présente (latéralisation).

Toutefois, puisque les analyses intra-sujet ont révélé que 80% des auditeurs n'ont pas d'asymétrie gauche/droite significative et/ou constante au gré des jours, les analyses ci-dessous ignorent l'oreille favorisée par la DIT.

3.3 Variabilité inter-individuelle dans les seuils initiaux

Une lecture horizontale de la Figure 1 indique une variabilité inter-individuelle forte dans les seuils initiaux, qui varient de 32 à 226 µs (5 à 33° de DIP). Les 2 seuils les plus à droite sont hors-norme, mais sont ceux de sujets d'âges très différents (30 et 57 ans). Les seuils initiaux sont significativement corrélés à l'âge ($R = .38$, $p = .03$) mais indépendants du sexe ($p = .99$). En moyenne, le seuil initial de latéralisation de ces 33 auditeurs est de 81 µs (DIP = 12°) ce qui est largement supérieur au seuil typique de 3° rapporté dans la littérature sur peu de sujets jeunes et expérimentés.

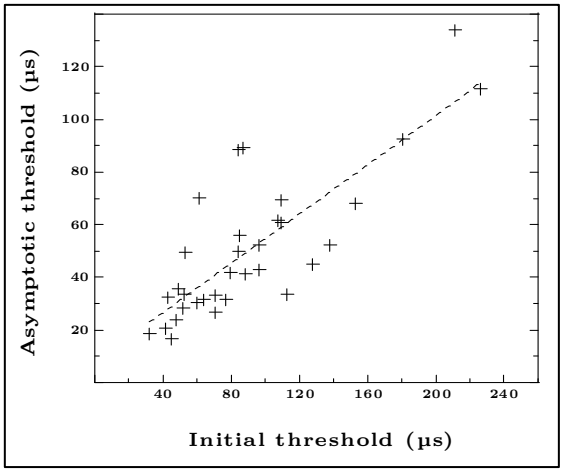

Figure 1 : Seuils de DIT (en µs) de 33 auditeurs au jour 1 (abscisse = seuils initiaux) et au jour 5 (ordonnée = seuils asymptotiques).

3.4 Modélisation des courbes d'apprentissage

4 des 33 auditeurs n'ont montré aucune baisse significative de leur seuil au gré des jours ($H < 6.3$, $p > .18$) et donc aucun effet d'apprentissage, bien que ces auditeurs aient des seuils initiaux au centre de la distribution représentée en Figure 1.

Pour les 29 autres auditeurs, l'apprentissage est significatif ($H > 9.0$, $p < .04$). Leurs seuils (en 10log(DIT) *ref* 1 µs) en fonction du jour ont donc été modélisés par l'Equation 1. Le modèle prédit les données expérimentales de manière satisfaisante ($r^2 \geq .79 \pm .13$) pour 26 de ces 29

auditeurs. La Figure 2 illustre en exemple les résultats pour 4 auditeurs. Le Tableau 1 précise toutes les valeurs mesurées et prédites par le modèle.

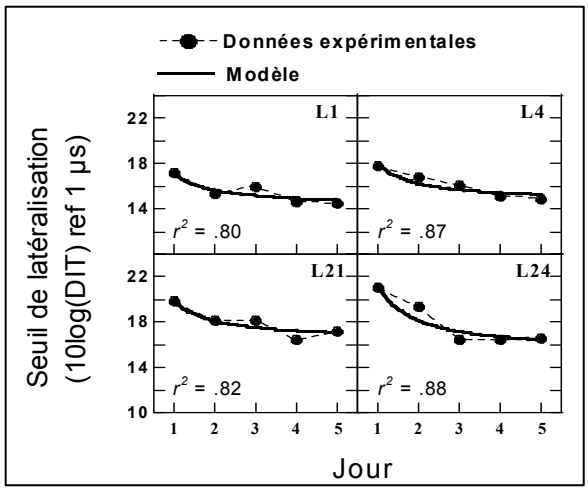

Figure 2 : Seuils de latéralisation en fonction du jour pour 4 sujets. Cercles = seuils mesurés. Courbes pleines = modélisation des résultats par l'Eq. 1. La robustesse du modèle est indiquée par la valeur du r^2.

Auditeur	A	B	C	D	E	F
L1	17.1	14.5	14.3	2.6	2.9	0.18
L2	17.2	15.3	15.3	1.9	1.8	0.11
L3	19.0	16.2	15.5	2.8	3.5	0.19
L4	17.8	14.9	14.7	2.9	3.1	0.21
L5	16.3	15.1	14.8	1.2	1.5	0.12
L6	16.5	12.3	11.7	4.3	4.8	0.33
L7	16.2	**13.2**	12.0	3.0	4.2	0.28
L9	21.4	17.2	17.1	4.2	4.3	0.24
L10	15.1	**12.7**	11.5	2.3	3.6	0.24
L11	19.3	17.5	17.4	1.8	1.9	0.11
L12	18.8	15.0	14.4	3.8	4.4	0.27
L13	16.8	13.8	13.2	3.0	3.6	0.25
L14	19.5	**16.2**	14.8	3.3	4.7	0.26
L15	19.3	17.0	16.4	2.3	2.8	0.15
L19	20.3	17.9	17.1	2.4	3.1	0.19
L20	22.6	19.7	19.9	2.9	2.7	0.15
L21	19.8	17.2	16.4	2.6	3.4	0.19
L22	18.5	**14.3**	12.4	4.2	6.1	0.39
L24	21.1	**16.5**	15.4	4.5	5.7	0.33
L26	18.5	15.2	14.5	3.2	4.0	0.24
L27	19.8	16.3	16.2	3.5	3.7	0.23
L28	21.8	**18.3**	17.2	3.5	4.6	0.23
L29	23.5	20.5	19.8	3.1	3.7	0.18
L30	20.5	**15.3**	13.4	5.3	7.1	0.44
L31	18.0	15.0	15.2	3.0	2.8	0.19
L33	20.4	17.8	17.6	2.5	2.7	0.14
Moyenne des 33 sujets	19.1	16.5	16.0	2.6	3.0	0.18

Tableau 1 : (A) seuil initial, (B) seuil asymptotique mesuré, (C) seuil asymptotique prédit (*A* dans l'Eq. 1), (D) apprentissage mesuré (seuil initial - seuil asymptotique mesuré), (E) apprentissage prédit (seuil initial - seuil asymptotique prédit), et (F) constante de temps (τ dans l'Eq. 1). Les valeurs de seuils et d'apprentissage dans les colonnes A–E sont exprimées en 10log(DIT) *ref* 1 µs. Les résultats sont présentés pour les 26 auditeurs pour lesquels le modèle s'est avéré robuste, ainsi que pour les données moyennes de l'ensemble des 33 auditeurs.

L'erreur standard associée à l'estimation des valeurs de *A* et τ dans le modèle est faible (environ 4%). Considérons que le seuil asymptotique prédit (colonne C dans le Tableau 1) est atteint si le seuil mesuré au jour *x* et au-delà diffère de la prédiction de moins de 5%. Ainsi, l'asymptote prédite a été atteinte au jour 2 pour 4% des auditeurs, au jour 3 pour 15%, au jour 4 pour 42%, et au jour 5 pour 12%. Pour les autres (voir valeurs en gras dans la colonne B du Tableau 1), le seuil mesuré au jour 5 diffère de l'asymptote prédite de 10% en moyenne.

Les constantes de temps (τ, voir colonne F dans le Tableau 1) varient de 0,11 à 0,44 (moyenne = 0,22). Elles ne sont pas corrélées à l'âge (R = .24, p = 24) ni au seuil initial (R = .02, p = 91).

Rappelons que 4 des 33 auditeurs ont complété 4 sessions journalières supplémentaires (total = 9 jours au lieu de 5). Pour 3 d'entre eux, qui avaient déjà atteint leur asymptote prédite en 5 jours, les sessions supplémentaires n'ont pas produit de baisse significative de leur seuil ni de changement dans l'estimation de l'asymptote prédite. Pour le quatrième sujet (L14), le seuil mesuré au jour 5 différait de l'asymptote prédite de 10% (voir Tableau 1). Ses seuils obtenus aux jours 7–9 sont significativement plus bas que celui au jour 5 d'après des analyses post-hoc (p = .03), mais l'estimation de l'asymptote prédite baisse de seulement 4%. Ceci indique que 5 sessions journalières de 300 essais semblent suffisantes pour (1) fournir une estimation fiable de ce que sera le seuil de DIT asymptotique d'un auditeur donné, et (2) estimer si cette asymptote est empiriquement atteinte. Globalement, 73% des asymptotes individuelles prédites ont été atteintes en 5 jours ou moins. Les seuils mesurés au jour 5 sont donc considérés ci-dessous comme les seuils asymptotiques.

3.5 Variabilité inter-individuelle dans la quantité d'apprentissage

La Figure 3 présente la quantité d'apprentissage mesurée (en 10log(DIT) *ref* 1 µs) pour les 33 auditeurs, en fonction de l'âge. Rappelons qu'une valeur de 3 correspond à une division par 2 du seuil de latéralisation entre le jour 1 et le jour 5. Les valeurs varient de -0,6 à 5,3 (moyenne = 2,6). La distribution des points suit une loi normale (Skewness et Kurtosis < +0.6 ; χ^2 = 3.1, p = .08). Les 3 valeurs les plus basses sont hors-normes, et sont celles d'auditeurs âgés de 29, 41 et 31 ans. L'apprentissage n'est pas corrélé à l'âge (R = .27, p = .15) et est indépendant du sexe (p = .23).

3.6 Variabilité inter-individuelle dans les seuils asymptotiques

Une lecture verticale de la Figure 1 indique une variabilité inter-individuelle forte dans les seuils asymptotiques, qui varient de 17 à 134 µs (DIP = 2 à 19°, 6° en moyenne). Le fait que l'apprentissage ait été en moyenne de 3, indiquant une division par 2 du seuil, est bien illustré par la différence d'échelle entre l'abscisse et l'ordonnée de la Figure 1. 60% de ces seuils asymptotiques individuels sont supérieurs au seuil typique de 3° classiquement rapporté dans la littérature sur de faibles effectifs de jeunes sujets expérimentés.

La corrélation entre seuils initiaux et seuils asymptotiques est forte ($R = .80$, $p < .0001$). Ceci indique que l'apprentissage n'a pas affecté le rang des auditeurs dans la distribution des seuils de latéralisation, et n'a pas réduit la variabilité inter-individuelle de ces seuils bien qu'un apprentissage significatif ait été observé sur 88% des auditeurs.

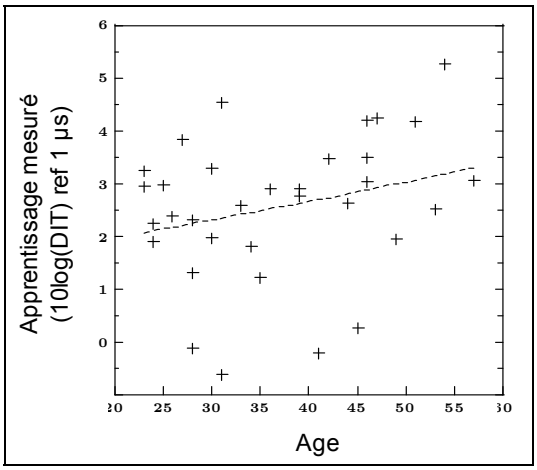

Figure 3 : Quantité d'apprentissage (en 10log(DIT) *ref* 1 µs) des 33 auditeurs en fonction de l'âge.

4 Discussion et Conclusions

4.1 Variabilité intra-individuelle en latéralisation

Le degré de variabilité des seuils de DIT d'un même sujet au sein d'une session journalière s'est avéré important, ce qui pourrait s'expliquer par une perte temporaire de l'indice pertinent [8]. Cette perte pourrait être liée à des effets d'adaptation [15] ou à des fluctuations temporelles de l'attention ou d'autres facteurs cognitifs [16, 17]. Il a récemment été proposé [18] que cette variabilité intra-sujet en latéralisation pourrait refléter du bruit interne dans le traitement neuronal des DIT, bruit qui pourrait varier d'un individu à l'autre [19]. Conformément, nous avons noté que le degré de variabilité intra-individuelle dépendait fortement de l'auditeur.

4.2 Asymétries gauche/droite en latéralisation

L'observation sur 7 hommes droitiers de meilleurs seuils de latéralisation lorsque la DIT favorisait l'oreille gauche est conforme à la relation entre asymétrie en localisation et sexe ou latéralité manuelle déterminée dans notre étude antérieure [9]. Nous avions attribué cette relation au fait que l'hémisphère cérébral droit est spécialisé dans la localisation auditive [20], mais que beaucoup de structures et fonctions cérébrales reconnues comme organisées asymétriquement s'avèrent beaucoup plus bilatérales chez les femmes [21] et les gauchers [22]. Nous avons malheureusement focalisé l'étude présente sur des caractéristiques d'âge et de sexe, et avons impliqué essentiellement des auditeurs droitiers faute de pouvoir recruter un nombre conséquent de gauchers.

4.3 Variabilité inter-individuelle en latéralisation

Sur une population de 33 auditeurs d'âges variés mais naïfs en latéralisation, nous avons noté une grande variabilité inter-individuelle dans les seuils initiaux (au jour 1). Cette variabilité s'est avéré indépendante de la participation préalable à une étude de localisation ou du sexe, mais légèrement corrélée à l'âge, ce que nous n'expliquons pas. En moyenne, le seuil initial de nos 33 auditeurs est de 12° (en décalage de phase), ce qui est très proche des valeurs moyennes rapportées dans les rares études sur de jeunes auditeurs naïfs pour des signaux similaires [23, 13].

Sur les 33 auditeurs, tous sauf 4 (12%) ont montré une baisse significative de leur seuil au gré des jours, et donc un apprentissage. Ceci est conforme à une des seules études sur l'apprentissage en latéralisation [23], ayant montré un apprentissage significatif pour 90% de 20 auditeurs.

Le degré d'apprentissage a généralement conduit à une division par 2 du seuil de latéralisation (performance au jour 5 deux fois meilleure qu'au jour 1), ce qui est également conforme à une étude antérieure sur une population d'auditeurs plus jeunes [23]. La variabilité inter-individuelle dans ce degré d'apprentissage s'est avérée raisonnable, indépendante du sexe mais aussi de l'âge de l'auditeur. Ce dernier point est contraire à l'hypothèse d'une diminution de la plasticité des mécanismes perceptifs et cognitifs avec l'âge, du moins pour la gamme d'âges considérée.

Une modélisation des seuils en fonction du jour par une fonction exponentielle décroissante nous a permis d'établir 2 constats principaux.

Premièrement, le décours temporel de l'apprentissage varie considérablement d'un auditeur à l'autre, mais n'est corrélé ni au sexe, ni à l'âge, ni au seuil initial. Ceci est contraire à des études antérieures sur d'autres tâches auditives (comme la discrimination fréquentielle) indiquant un temps d'apprentissage plus long chez les auditeurs avec des seuils initiaux élevés [24]. Nous avons observé que la majorité de l'apprentissage survenait pendant la première heure de test (jour 2), comme en témoigne la forme exponentielle décroissante de la fonction appliquée aux résultats. Ceci est conforme à l'hypothèse de Wright [13, 18] selon laquelle le traitement des DIT est moins malléable que le traitement des DII, d'où le constat antérieur que l'apprentissage aux DIT stagne rapidement tandis que l'apprentissage aux DII continue au gré des sessions. Ainsi, l'apprentissage observé avec des DIT serait procédural (acquisition des contraintes de la tâche) plutôt que perceptif (affinement dans le traitement du stimulus).

Deuxièmement, le modèle a permis d'estimer ce que serait le seuil asymptotique de chaque auditeur s'il était surentraîné (par exemple pendant plusieurs dizaines d'heures). Pour 73% des auditeurs pour lesquels le modèle s'est avéré robuste, cette asymptote prédite a été atteinte en 3 à 5 sessions journalières de 40 minutes. Conformément, 3 de 4 sujets ayant complété 4 sessions additionnelles n'ont montré ni baisse de leur seuil ni modification de l'estimation de leur asymptote. Ce résultat indique que les études classiques sur la latéralisation avec des indices de DIT ont utilisé des temps d'entraînement largement surévalués. Le fait que l'étude présente révèle une variabilité inter-individuelle importante avant et après apprentissage indique que les études antérieures ont impliqué des effectifs de sujets trop petits. Nous suggérons que les futures études sur la discrimination de DIT privilégie la taille de l'échantillon de sujets et diminue les temps d'entraînement à la tâche. De plus, pour l'évaluation du décours temporel de l'apprentissage, les seuils de DIT devraient être présentés sur une échelle logarithmique puis

modélisés par une fonction exponentielle plutôt que sur une échelle linéaire puis modélisés par une régression linéaire. Ce dernier cas pourrait suggérer des effets erronés d'apprentissage à long terme, sans quantification du gain réel (voir par exemple la Fig. 4 dans [8]).

Puisque la variabilité inter-individuelle dans le degré d'apprentissage est plutôt faible, les seuils asymptotiques (au jour 5 = DIP de 2 à 19°) des 33 auditeurs se sont avérés aussi dispersés que les seuils initiaux (au jour 1 = DIP de 5 à 33°). Ceci indique que l'apprentissage améliore la performance d'un individu donné mais n'élimine pas les différences entre individus. 60% des 33 seuils asymptotiques recueillis sont supérieurs au seuil typique de 3° longtemps rapporté dans la littérature sur 3–4 sujets jeunes et surentraînés. Ceci suggère que ce seuil «typique» n'est peut-être pas représentatif de la population parente.

Nous avons observé que la variabilité inter-individuelle dans les seuils initiaux et asymptotiques ne pouvait s'expliquer ni par l'âge, ni par le sexe, ni par la participation préalable à un test de localisation en champ libre. Une étude en cours non publiée a indiqué que la variabilité en localisation auditive, notamment en milieu bruyant, pourrait s'expliquer par la différence entre individus dans l'activité de certains mécanismes physiologiques centraux, telle que la force du réflexe du faisceau olivo-cochléaire médian.

Références

[1] Carlile, S., Leong, P., Hyams, S. "The nature and distribution of errors in sound localization by human listeners" *Hear. Res.*, 114, 179-196 (1997).

[2] Wightman, F.L., Kistler, D.J. "Headphone simulation of free-field listening: II: Psychophysical validation" *J. Acoust. Soc. Am.*, 85, 868-878 (1989).

[3] Wenzel, E.M., Arruda, M., Kistler, D.J., Wightman, F.L. "Localization using nonindividualized head-related transfer functions" *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 111-123 (1993).

[4] Buus, S., Scharf, B., Florentine, M. "Lateralization and frequency selectivity in normal and impaired hearing" *J. Acoust. Soc. Am.*, 76, 77-86 (1984).

[5] Yost, W. "Lateralization of pulsed sinusoids based on interaural onset, ongoing, and offset temporal differences" *J. Acoust. Soc. Am.*, 61, 190-194 (1977).

[6] McFadden, D., Pasanen, E.G. "Lateralization at high frequencies bases on interaural time differences" *J. Acoust. Soc. Am.*, 59, 634-639 (1976).

[7] Klumpp, R.G., Eady, H.R. "Some measurements of interaural time difference thresholds" *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 859-860 (1956).

[8] Saberi, K., Antonio, J.V. "Precedence-effect thresholds for a population of untrained listeners as a function of stimulus intensity and interclick interval" *J. Acoust. Soc. Am.*, 114, 420-429 (2003).

[9] Savel, S. "Individual differences and left/right asymmetries in auditory space perception. I. Localization of low-frequency sound sources in free field" *Hear. Res.*, 255, 142-154 (2009).

[10] Levitt, H. "Transformed up-down methods in psychoacoustics" *J. Acoust. Soc. Am.*, 49, 467-477 (1971).

[11] Oldfield, R.C. "The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory" *Neuropsychologia*, 9, 97-113 (1971).

[12] Saberi, K., Perrott, D.R. "Lateralization thresholds obtained under conditions in which the precedence effect is assumed to operate" *J. Acoust. Soc. Am.*, 87, 1732-1737 (1990).

[13] Wright, B.A., Fitzgerald, M.B. "Different patterns of human discrimination learning for two interaural cues to sound-source location" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 98, 12307-12312 (2001).

[14] Saberi, K. "Some considerations on the use of adaptive methods for estimating interaural-delay thresholds" *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 1803-1806 (1995).

[15] Hafter, E.R., Buell, T.N, Richards, V.M. "Onset-coding in lateralization: Its form, site and function" In *Auditory function*, Wiley, New-York (1988).

[16] Clifton, R.K. "Breakdown of echo suppresion in the precedence effect" *J. Acoust. Soc. Am.*, 82, 1834-1835 (1987).

[17] Blauert, J., Col, J. "Irregularities in the precedence effect" In *Auditory Physiology and perception: Proceedings of the 9th International Symposium on Hearing*, Pergamon, Oxford, pp 531–538 (1991).

[18] Zhang, Y., Wright, B.A. "Similar patterns of learning and performance variability for human discrimination of interaural time differences at high and low frequencies" *J. Acoust. Soc. Am.*, 121, 2207-2216 (2007).

[19] Takahashi, C.D., Nemet, D., Rose-Gottron, C.M., Larson, J.K., Cooper, D.M., Reinkensmeyer, D.J. "Neuromotor noise limits motor performance, but not motor adaptation, in children" *J. Neurophysiol.*, 90, 703-711 (2003).

[20] Zatorre, R.J., Bouffard, M., Ahad, P., Belin, P. "Where is 'where' in human auditory cortex?" *Nat. Neurosci.*, 5, 905-909 (2002).

[21] Voyer, D. "On the magnitude of laterality effects and sex differences in functional lateralities" *Laterality*, 1, 51-83 (1996).

[22] Peters, M. "Handedness and its relation to other indices of cerebral lateralization" In *Brain Asymmetry*, MIT Press (1995).

[23] Rowan, D., Lutman, M.E. "Learning to discriminate interaural time differences at low and high frequencies" *Int. J. Audiol.*, 46, 585-594 (2007).

[24] Amitay, S., Hawkey, D.J.C, Moore, D.R. "Auditory frequency discrimination learning is affected by stimulus variability" *Percept. Psychosphys.*, 67, 691-698 (2005).