

CFA/VISHNO 2016

**Localisation d'un bruit blanc en fonction de son azimuth,
en écoute binaurale vs. monaurale**

V. Mazo^a, M. Paquier^a, C. Carriou^b, B. Jantzen^b et R. Marianowski^c

^aUBO, Lab-STICC UMR CNRS 6285, 6 avenue Victor Le Gorgeu, CS 93837, 29238
Brest Cedex 3, France

^bCentre auditif Entendre Brest, 4, Square Commandant L'Herminier, 29200 Brest,
France

^cService ORL CHRU Morvan, 2, avenue Foch, 29609 Brest, France
vincent.mazo@gmail.com



LE MANS

Lorsque l'information d'une seule oreille est disponible (normo-entendant avec une oreille bouchée ou malentendant atteint d'une cophose unilatérale), seuls les indices monauraux sont disponibles. L'objectif de cette étude était d'observer dans quelle mesure la localisation de sources en azimut, généralement rendue possible par l'exploitation des différences interaurales de temps et de niveau, était possible uniquement grâce à des indices monauraux. Un bruit blanc a été diffusé par différentes enceintes situées autour des auditeurs (avec des cophoses unilatérales réelles ou simulées), dont la tâche était de se tourner en direction de la source perçue. Les résultats sont apparus particulièrement hétérogènes. Certains sujets ont perçu à l'avant tous les stimuli. D'autres les ont perçus intégralement à l'arrière, ou du côté de l'oreille fonctionnelle. Enfin certains sujets ont montré des performances de localisation correctes.

1 Introduction

Deux familles de paramètres permettent la localisation d'une source sonore : les indices interauraux (différences interaurales de temps (ITD) et d'intensité (ILD)) et les indices monauraux (spectraux) [1]. Ces derniers sont caractérisés par la modification du spectre en fonction de la direction de la source, en raison de l'influence des pavillons, de la tête et du torse [2, 3].

Pour des sujets normo-entendants, les indices interauraux sont largement mis à contribution pour la localisation en azimut [1]. Les indices spectraux sont utilisés de manière complémentaire pour résoudre les inversions avant-arrière. Ils sont également utiles pour la localisation en élévation [2, 4]. Pour des sujets atteints d'une perte sévère d'un seul côté, les indices interauraux sont dégradés ou absents. Ces sujets sont donc contraints d'utiliser les indices spectraux pour la localisation en azimut. Les performances de localisation sont alors fortement diminuées [5].

La technologie CROS (Contralateral Routing Of Sound) vise à améliorer l'intelligibilité pour des patients atteints d'une perte unilatérale. Elle consiste à prélever le son du côté de l'oreille lésée pour le réinjecter dans l'oreille saine. Néanmoins, ce dispositif bouleverse les indices spectraux, ceux-ci, normalement différents dans chaque oreille, se retrouvant sommés dans une seule oreille. Il a toutefois été démontré qu'il est possible d'apprendre à utiliser des indices spectraux altérés ou modifiés [6].

Dans la présente étude, les performances de localisation en azimut de sujets normo-entendants avec une oreille bouchée, ou de sujets atteints d'une perte unilatérale ont été étudiées. Certains sujets étaient habituellement équipés de prothèse de type CROS.

2 Matériel et méthode

2.1 Participants

Les participants de l'étude étaient classés en trois groupes différents. Les deux premiers groupes comprenaient des sujets malentendants, présentant une perte sévère à profonde non appareillable sur l'oreille lésée. L'oreille saine ne présentait aucune perte auditive supérieure à 20 dB HL de 125 Hz à 4000 Hz après une éventuelle correction.

Dans le premier groupe, les 9 sujets (5 femmes, 4 hommes, moyenne d'âge de 49 ans) étaient appareillés de prothèse CROS/BiCROS depuis plus d'un an.

Dans le deuxième groupe les 7 sujets (4 femmes, 3 hommes, moyenne d'âge de 25 ans) ne portaient pas de prothèse auditive.

Le troisième groupe était constitué de 14 sujets (9 hommes, 5 femmes, moyenne d'âge de 27 ans) à l'audiogramme normal.

Pour les normo-entendants, un bouchon d'oreille était utilisé pour simuler une perte auditive unilatérale (atténuation de -30 dB à -40 dB de 250 Hz à 8 kHz). Le bouchon était mis en place de manière aléatoire à droite (6 sujets) ou à gauche (8 sujets).

2.2 Dispositif

Le test se déroulait dans une salle insonorisée avec un bruit de fond de 34 dBA. Le sujet était assis sur un siège pivotant, sa tête était maintenue en place à l'aide d'une mentonnière. Un tissu acoustique opaque cachait les 8 haut-parleurs (Sib Focal JM lab) espacés de 45° et positionnés sur un cercle de 3,5m de diamètre.

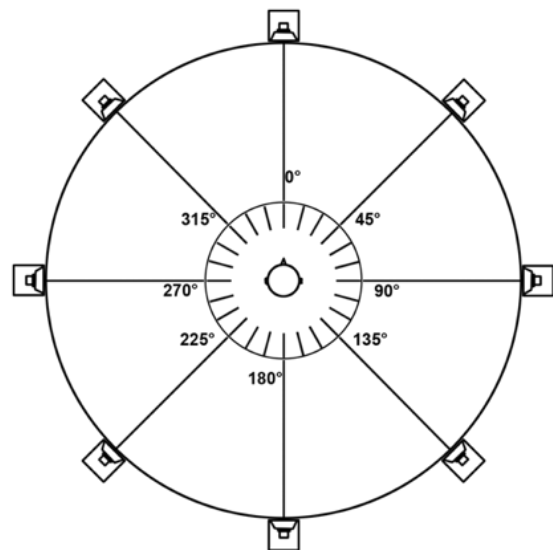


Figure 1 : Positionnement du sujet au centre du cercle de 8 haut-parleurs.

La cible à localiser était un bruit blanc de 150 ms à 65 dBA à hauteur de la tête du sujet, envoyé aléatoirement sur l'un des 8 haut-parleurs. Comme seulement 8 haut-parleurs ont été utilisés et pour éviter que les auditeurs ne mémorisent leur position facilement, des stimuli « trompeurs » ont été intercalés entre chaque stimulus test. Pour ceux-ci, des signaux similaires étaient diffusés sur deux haut-parleurs consécutifs en stéréophonie d'intensité. Les sources virtuelles obtenues étaient donc placées entre les deux haut-parleurs. Les sujets devaient localiser les cibles et les trompeurs de la même manière. Néanmoins seuls les résultats de localisation des cibles (diffusées sur un seul haut-parleur) ont été considérés.

Une prothèse CROS expérimentale simplifiée a été réalisée en utilisant un microphone omnidirectionnel (DPA 4060) positionné au dessus de l'oreille lésée (ou obstruée par un bouchon pour les normo-entendants) et un écouteur à évent ouvert (Widex M), utilisé classiquement pour les prothèses auditives. Aucun traitement n'a été appliqué au signal, mis à part la modification du spectre induite par la réponse du couple microphone-écouteur. Le niveau de sortie du haut-parleur a été calibré de telle manière à ce qu'il soit identique à celui du signal perçu par le microphone.

2.3 Procédure

Le sujet était positionné dans l'axe 0° et devait se tourner dans la direction perçue du son. L'angle de rotation du siège était alors enregistré avec une précision de 1° . Le sujet retournait à la position 0° et un nouveau stimulus était alors proposé.

Chaque séance débutait par une mise en situation pour que le sujet se familiarise avec l'exercice durant quelques minutes.

Deux ou trois conditions de test (appelées conditions « oreilles » dans la suite du texte) étaient réalisées en fonction du groupe du sujet :

Tableau 1: Conditions « oreilles » pour chaque groupe.

Groupe 1 : Malentendants appareillés	Groupe 2 : Malentendants non-appareillés	Groupe 3 : Normo- entendants
-	-	Oreilles nues (E)
Sans la prothèse CROS habituelle (A)	Sans la prothèse CROS expérimentale (C)	Une oreille bouchée, avec la prothèse CROS expérimentale (F)
Avec la prothèse CROS habituelle (B)	Avec la prothèse CROS expérimentale (D)	Une oreille bouchée, sans la prothèse CROS expérimentale (G)

Une série (pour une condition « oreilles ») durait environ 15 minutes. Les séries se déroulaient dans un ordre aléatoire et étaient séparées par une pause de quelques minutes, laissant le temps de modifier le dispositif de test (mise en place du bouchon, ou des prothèses).

Chacune des 8 position-cibles était testée 3 fois dans un ordre aléatoire lors d'une série ($8 \times 3 = 24$ stimuli par série).

3 Résultats

Les résultats ont été analysés avec une ANOVA à mesures répétées. Les résultats des sujets avec l'oreille droite lésée ont été symétrisés droite-gauche et ajoutés aux résultats des sujets avec l'oreille gauche lésée.

3.1 Taux de localisation correcte par groupe

Les réponses des candidats ont été classés dans 8 cadrans de 45° chacun, centrés sur la position réelle des sources. Une réponse était considérée comme correcte lorsqu'elle était située dans le cadran associé au stimulus. Un sujet avait donc 12,5% de chance d'obtenir une bonne réponse en répondant au hasard.

Des analyses statistiques ont été menées groupe par groupe de manière à caractériser les effets simples de la condition « oreilles » et de la position de la cible, et l'interaction éventuelle entre ces deux variables.

3.1.1 Malentendants appareillés

Un T-test a montré que les taux de bonnes réponses n'étaient pas significativement supérieurs au hasard, avec ou sans leur prothèse CROS habituelle.

Par ailleurs, une ANOVA à mesures répétées n'a montré ni effet simple de la position de la cible ($F(7,56)=0.939$, $p=0.430$), ni interaction de la condition « oreilles » avec la position ($F(7,56)=0.715$, $p=0.551$).

Pour les malentendants appareillés, les performances de localisation étaient donc extrêmement mauvaises (quelle que soit la direction de la source), que la prothèse CROS soit portée ou non.

3.1.2 Malentendants non-appareillés

Avec la prothèse CROS expérimentale, un T-test a montré que les taux de bonnes réponses n'étaient pas significativement supérieurs au hasard.

Sans la prothèse, le taux de bonnes réponses restait très faible (28,6%). Néanmoins, le T-test a montré qu'il était significativement différent du hasard ($T(55)=3.05$, $p=0,035$).

L'analyse de l'effet de la position n'a pas montré de différences significatives ($F(7,42)=2.742$, $p=0.064$). Une tendance est néanmoins visible (figure 2) : les performances semblent meilleures du côté de l'oreille saine, en particulier pour la position 90° . Le taux de réponses correctes est très faible pour la position 0° (face au sujet). Une observation précise de ces erreurs a révélé que celles-ci concernaient principalement des inversions avant-arrière.

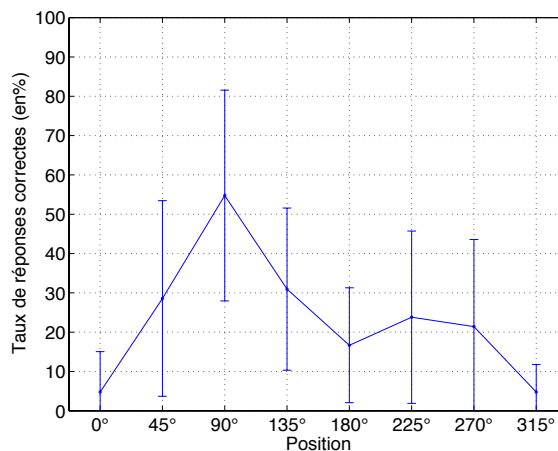


Figure 2 : Taux de réponses correctes en fonction de la position du stimulus pour les sujets malentendants non-appareillés.

L'ANOVA à mesures répétées n'a pas montré d'interaction significative ($F(7,42) = 0.674$, $p=0.571$) entre la condition « oreilles » et la position de la cible.

Les scores de localisation des malentendants non-appareillés se sont donc globalement révélés très faibles (surtout lorsque la prothèse CROS expérimentale était portée).

3.1.3 Normo-entendants

L'étude statistique a montré une différence significative ($F(2,26)=61.675$, $p<0.001$) entre les différentes conditions « oreilles » pour les sujets normo-entendants. Le post-hoc de Bonferroni a révélé une différence significative entre la condition « oreilles nues » et les deux autres conditions pour lesquelles les sujets avaient une oreille obturée ($p<0.001$ dans les deux cas). En revanche, les résultats obtenus lorsque l'oreille était obturée n'était pas significativement différents avec ou sans prothèse CROS ($p=0.932$). L'obturation d'une oreille entraînait donc une dégradation de la localisation, et celle-ci n'était pas compensée par le port d'une prothèse CROS (figure 3).

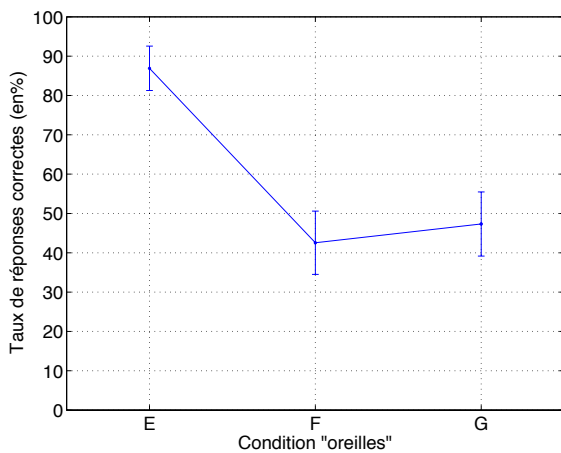


Figure 3 : Taux de réponses correctes en fonction de la condition « oreilles » pour les sujets normo-entendants : oreilles nues (E), avec bouchon et prothèse CROS expérimentale (F), avec le bouchon seul (G)

L'effet de la position (figure 4) s'est également révélé significatif ($F(7,91)=6.816$, $p<0.001$).

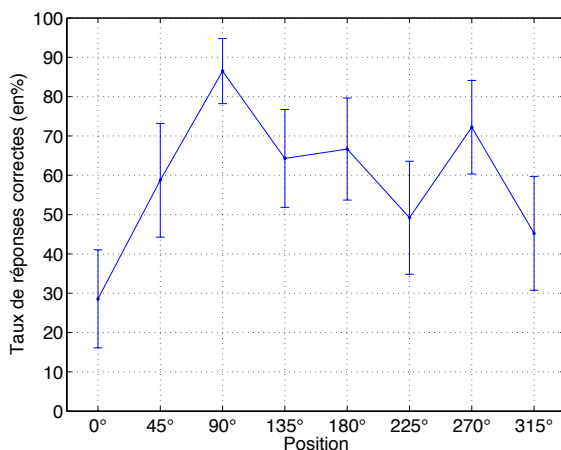


Figure 4 : Taux de réponses correctes en fonction de la position du stimulus pour les sujets normo-entendants.

Le post-hoc de Bonferroni a mis en évidence des différences significatives pour plusieurs positions par rapport à la position 90° (située du côté de l'oreille saine) : 225° ($p=0.030$), 315° ($p=0.001$), 0° ($p<0.001$) et 45° ($p=0.039$). De même, le post-hoc a révélé des différences

significatives par rapport à la position 270° (située du côté de l'oreille bouchée) et les positions 315° et 0° (respectivement $p=0.048$ et $p<0.001$). Le faible taux de réponses correctes pour la position 0° concernait principalement des inversions avant-arrière.

Le test statistique n'a pas montré d'interaction entre la position et la condition « oreilles » ($F(14,182)=1.552$, $p=0.175$) pour les sujets normo-entendants.

L'obturation d'une oreille (avec ou sans prothèse CROS) dégradait systématiquement (pour toutes les positions de cibles) la localisation (figure 5). En revanche, la dégradation engendrée par l'obturation d'une oreille semble moins importante pour la position 90° (du côté de l'oreille restée libre), et plus importante du côté de l'oreille obturée.

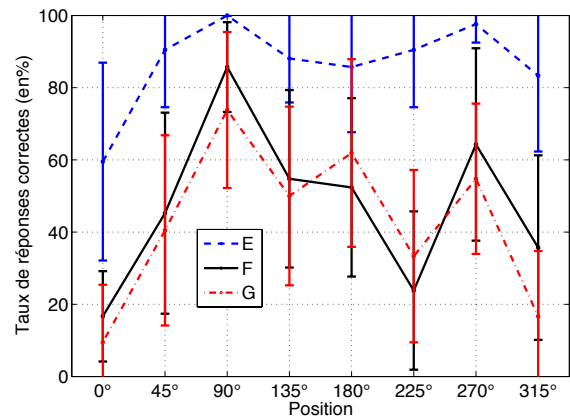


Figure 5 : Interaction entre la condition « oreilles » et la position pour les sujets normo-entendant : oreilles nues (E), avec bouchon et prothèse CROS expérimentale (F), avec le bouchon seul (G)

3.2 Taux de localisation correcte : Comparaison entre groupes

Des analyses statistiques ont été menées en confrontant les résultats obtenus pour chacun des groupes (malentendants appareillés, malentendants non-appareillés, normo-entendants) dans des conditions comparables, de manière à caractériser les effets simples du groupe et de la position de la cible, et l'interaction éventuelle entre ces deux variables.

3.2.1 Avec une oreille lésée, sans prothèse CROS

Pour cette comparaison, les sujets malentendants (appareillés ou non) ne portaient pas de prothèse CROS (conditions « oreilles » A et C) et les sujets normo-entendants avaient une oreille bouchée (condition « oreilles » G). Tous les sujets présentaient donc une oreille saine et une oreille lésée, mais aucun ne portaient de prothèse CROS.

L'analyse de l'effet du groupe a montré des différences significatives ($F(2,27)=14.900$, $p<0.001$). Le post-hoc de Bonferroni a mis en évidence des différences significatives entre le groupe des normo-entendants et les deux autres groupes de malentendants ($p<0.001$ pour les malentendants appareillés ; $p=0.024$ pour les malentendants non-appareillés). En revanche la différence entre les groupes de malentendants appareillés et non appareillés n'était pas significative ($p=0.194$; figure 6).

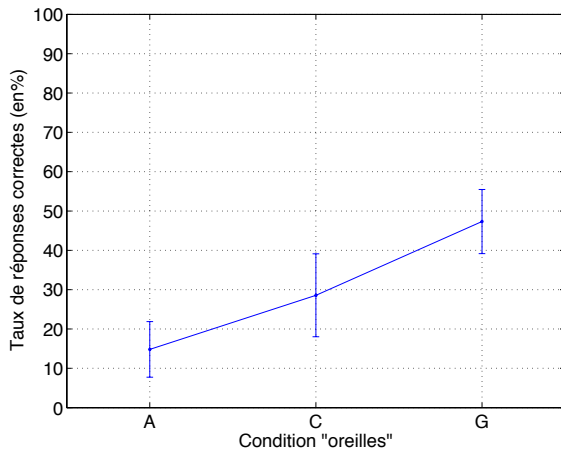


Figure 6 : Taux de réponses correctes en fonction du groupe : malentendants appareillés sans leur prothèse CROS habituelle (A), malentendants non appareillés sans prothèse CROS expérimentale (C), et normo-entendants avec une oreille bouchée sans la prothèse CROS expérimentale (G).

Comme attendu (§3.1), l'analyse statistique a montré un effet significatif de la position ($F(7,189)=4.851$, $p<0.001$). Le post-hoc de Bonferroni a indiqué que la localisation était significativement meilleure pour la position 90° (du côté de l'oreille libre) que pour les positions 0° , 225° et 315° (respectivement $p<0.001$, $p=0.010$ et $p<0,001$) (figure 7).

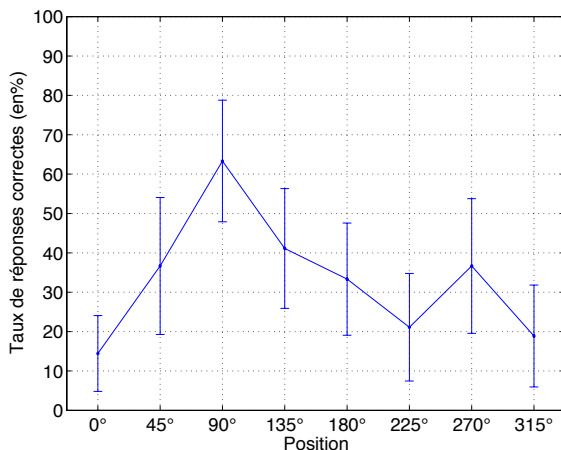


Figure 7 : Taux de réponses correctes en fonction de la position pour les malentendants appareillés sans leur prothèse CROS habituelle (A), les malentendants non appareillés sans prothèse CROS expérimentale (C), et les normo-entendants avec une oreille bouchée sans la prothèse CROS expérimentale (G).

L'ANOVA n'a pas indiqué d'interaction entre le groupe et la position ($F(14,189) = 1.402$, $p=0.198$)

3.2.2 Avec une oreille lésée et une prothèse CROS

Pour cette comparaison, les sujets malentendants appareillés portaient leur prothèse CROS habituelle (B), les sujets malentendants non appareillés étaient équipés de la prothèse CROS expérimentale (D) et les sujets normo-entendants avaient une oreille bouchée et étaient également équipés de la prothèse CROS expérimentale simplifiée (F). Tous les sujets présentaient donc dans cette analyse une oreille saine et une oreille lésée, équipée d'une prothèse CROS.

L'analyse de l'effet du groupe s'est révélée significative ($F(2,27)=22.636$, $p<0.001$). Le post-hoc de Bonferroni a mis en évidence des différences significatives entre le groupe des normo-entendants et les deux autres groupes de malentendants ($p<0.001$ pour les malentendants appareillés ; $p=0.002$ pour les malentendants non appareillés). En revanche les différences entre les groupes de malentendants appareillés et non appareillés n'étaient pas significatives ($p=0.194$; figure 8).

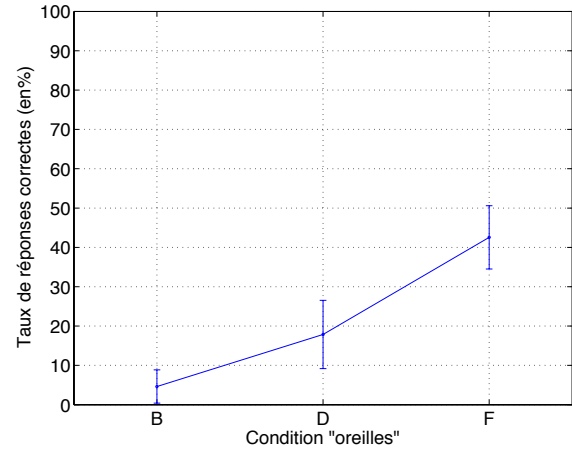


Figure 8 : Taux de réponses correctes en fonction du groupe : malentendants appareillés avec leur prothèse CROS habituelle (B), malentendants non appareillés avec la prothèse CROS expérimentale (D), et normo-entendants avec une oreille bouchée équipés de la prothèse CROS expérimentale (F).

L'effet de la position s'est également révélé significatif ($F(7,189)=3.647$, $p=0,008$). Le post-hoc de Bonferroni a mis en évidence des différences significatives entre la position 90° et les positions 0° et 315° (respectivement $p=0.004$ et $p=0,002$; figure 9).

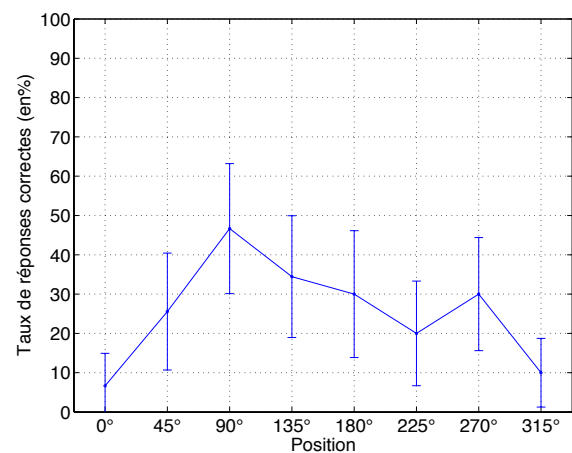


Figure 9 : Taux de réponses correctes en fonction de la position pour les malentendants appareillés avec leur prothèse CROS habituelle (B), les malentendants non appareillés avec la prothèse CROS expérimentale (D), et les normo-entendants avec une oreille bouchée équipés de la prothèse CROS expérimentale (F).

L'ANOVA n'a pas indiqué d'interaction significative entre le groupe et la position de la cible ($F(14,189)=1.600$, $p=0.132$).

Les résultats obtenus par les normo-entendants dont une oreille avait été obturée se sont donc systématiquement révélés meilleurs que ceux obtenus par les sujets malentendants appareillés ou non-appareillés, qu'une prothèse (habituelle ou expérimentale) soit portée ou non. Les pertes virtuelles réalisées par l'obturation d'une l'oreille des normo-entendants (30 à 40 dB) étaient moins importantes que les pertes réelles des malentendants (souvent supérieures à 70 dB). En conséquence, chez les normo-entendants, il est possible qu'une ILD résiduelle subsiste, ce qui limiterait les dégradations de performance de localisation.

3.3 Analyses individuelles

En complément de l'observation des taux de bonnes réponses, les distributions des positions de source reportées par les sujets ont été observées individuellement.

3.3.1 Malentendants appareillés

La figure 10 présente la superposition de toutes les réponses (i.e. pour toutes les positions de cible) des sujets malentendants appareillés, pour chacune des deux conditions « oreilles » testées : sans ou avec leur prothèse CROS habituelle (respectivement A et B).

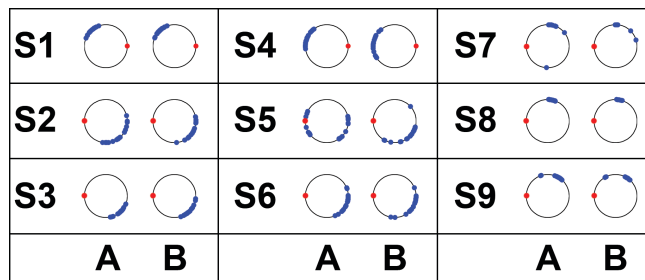


Figure 10 : Diagrammes de répartition des réponses pour les sujets malentendants appareillés : sans leur prothèse CROS habituelle (A), avec leur prothèse CROS habituelle (B). L'avant du sujet est dirigé vers le haut. Le côté de l'oreille lésée est représenté par un point rouge.

S1 et S4 concentraient toutes leurs réponses à l'avant, du côté de l'oreille saine. S2, S3 et S6 répondaient systématiquement à l'arrière, du côté de l'oreille saine. Les réponses des sujets S7, S8 et S9 étaient concentrées à l'avant. S5 localisait des deux cotés ou à l'arrière.

Les schémas de réponses étaient similaires dans les conditions « oreilles » A et B (respectivement sans et avec prothèse CROS habituelle), pour 8 sujets sur 9.

3.3.2 Malentendants non-appareillés

La figure 11 présente la superposition de toutes les réponses (i.e. pour toutes les positions de cible) des sujets malentendants non appareillés, pour chacune des deux conditions « oreilles » testées : sans ou avec prothèse CROS expérimentale (respectivement C et D).

Les réponses du sujet S10 étaient majoritairement situées à l'avant du côté de l'oreille saine. S11, S12, S13 et S14 répondaient principalement à l'arrière du côté de l'oreille saine. S15 et S16 localisaient des deux côtés, principalement à l'arrière.

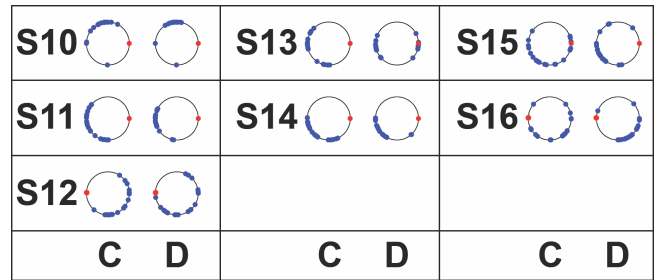


Figure 11 : Diagramme de répartition des réponses pour les sujets malentendants non-appareillés : sans la prothèse CROS expérimentale (C), avec la prothèse CROS expérimentale (D). L'avant du sujet est dirigé vers le haut. Le côté de l'oreille lésée est représenté par un point rouge.

Les schémas de réponses étaient similaires dans les conditions « oreilles » C et D (respectivement sans et avec prothèse CROS expérimentale).

De plus, ces schémas apparaissaient assez similaires à ceux obtenus par les sujets du premier groupe (malentendants appareillés portant ou non leur prothèse).

3.3.3 Normo-entendants

La figure 12 présente la superposition de toutes les réponses (i.e. pour toutes les positions de cible) des sujets normo-entendants, pour chacune des trois conditions « oreilles » testées : oreilles nues, une oreille bouchée avec prothèse CROS expérimentale, une oreille bouchée sans prothèse CROS expérimentale (respectivement E, F et G).

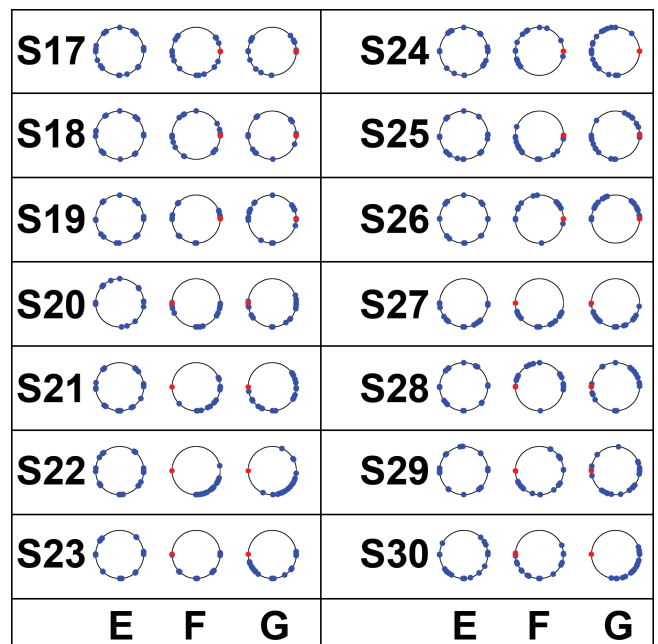


Figure 12 : Diagrammes de répartitions des réponses pour les sujets normo-entendants : oreilles nues (E), avec une oreille bouchée et la prothèse CROS expérimentale (F), avec une oreille bouchée mais pas de prothèse CROS expérimentale (G). L'avant du sujet est dirigé vers le haut. Le côté de l'oreille lésée est représenté par un point rouge.

Les diagrammes obtenus pour le groupe des normo-entendants indiquaient une répartition des réponses homogène dans toutes les directions pour la condition « oreilles nues » (E). Une analyse individuelle des résultats montre que les erreurs de localisation étaient généralement

très faibles dans cette condition « oreilles nues », en particulier à l'avant.

Néanmoins, certaines erreurs systématiques étaient visibles pour certains sujets : pour les sujets S21 et S22, les réponses pour la position 0° étaient reportées à l'arrière (inversion avant-arrière). Les réponses du sujet S20 pour la position arrière gauche étaient reportées à l'avant gauche. De même, le sujet S27 répondait systématiquement dans le demi-espace arrière avec des inversions avant-arrière pour tous les stimuli situés dans le demi-espace avant (figure 13).

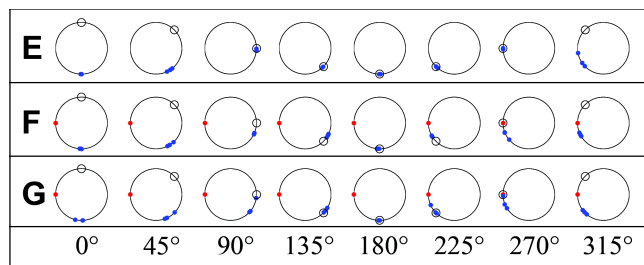


Figure 13 : Détails des réponses du sujet S27 pour chaque position et chacune des trois conditions « oreilles » : oreilles nues (E), avec une oreille bouchée et la prothèse CROS expérimentale (F), avec une oreille bouchée mais pas de prothèse CROS (G). L'avant du sujet est dirigé vers le haut. Le côté de l'oreille lésée est représenté par un point rouge. La position de la cible est représentée par un cercle noir.

Pour 10 sujets (S17, S20, S21, S22, S23, S24, S26, S27, S28, S30), les résultats obtenus (figure 12) dans les conditions « oreilles » F (avec une oreille bouchée et la prothèse CROS expérimentale) étaient proches de ceux obtenues dans la condition « oreilles » G (avec une oreille bouchée, sans prothèse CROS expérimentale). Les ressemblances étaient néanmoins moins marquées que pour les sujets malentendants (§3.3.1 et §3.3.2).

Pour les sujets S18, S19, S25 et S29, une étude approfondie des résultats individuels a révélé que les différences entre les diagrammes des conditions « oreilles » F et G correspondaient généralement à des inversions avant-arrière.

Avec ou sans la prothèse CROS expérimentale, la similarité des schémas de réponses entre plusieurs sujets était moins nette que pour les deux premiers groupes. Néanmoins, les sujets S20, S21, S22, S23, S27 et S30 localisaient souvent les sources à l'arrière ; les sujets S26 et S28 localisaient principalement à l'avant.

4 Discussion

Les malentendants (appareillés ou non) ont montré de très mauvaises performances de localisation (proches du hasard). Le port d'une prothèse CROS (habituelle ou expérimentale) n'améliore pas les performances des malentendants appareillés et dégrade les performances des

malentendants non-appareillés. Ces résultats sont en accord avec ceux d'études précédentes [7].

La moyenne d'âge plus élevée dans le groupe des malentendants appareillés implique vraisemblablement une acuité auditive plus faible dans les hautes fréquences du côté de l'oreille « saine ». De plus, la réponse en fréquence des prothèses CROS (habituelle ou expérimentale) était médiocre, en particulier à partir de 4kHz ce qui pourrait avoir pour conséquence de dégrader les indices monauraux et ainsi rendre la tâche de localisation plus difficile avec une prothèse CROS [3].

Les normo-entendants dont on a obturé une oreille (avec ou sans prothèse CROS expérimentale) localisaient mieux les sources que les malentendants (possiblement à cause de l'atténuation du bouchon qui n'était pas totale).

Beaucoup de malentendants ont montré des schémas récurrents de localisation (les cibles, quelle que soit leur direction réelle, étaient systématiquement localisées devant, ou derrière, ou du côté de l'oreille saine). Chez les normo-entendants avec une oreille obturée, ces schémas étaient moins flagrants.

Références

- [1] J. Blauert, *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press (1997).
- [2] E. H. Langendijk and A. W. Bronkhorst, "Contribution of spectral cues to human sound localization," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, no. 4, pp. 1583–1596 (2002).
- [3] M. J. H. Agterberg, M. K. S. Hol, M. M. Van Wanrooij, A. J. Van Opstal, and A. F. M. Snik, "Single-sided deafness and directional hearing: contribution of spectral cues and high-frequency hearing loss in the hearing ear," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 8 (2014).
- [4] J. C. Middlebrooks, "Spectral shape cues for sound localization," *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*, pp. 77–97 (1997).
- [5] S. M. Abel and K. Lam, "Impact of unilateral hearing loss on sound localization," *Applied Acoustics*, vol. 69, no. 9, pp. 804–811 (2008).
- [6] M. M. Van Wanrooij, "Relearning Sound Localization with a New Ear," *Journal of Neuroscience*, vol. 25, no. 22, pp. 5413–5424 (2005).
- [7] T. Van den Bogaert, T. J. Klases, M. Moonen, L. Van Deun, and J. Wouters, "Horizontal localization with bilateral hearing aids: Without is better than with," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 119, no. 1, p. 515 (2006).