

CFA/VISHNO 2016

Dégradation des performances de localisation sonore causée par des systèmes tactiques de communication et protection

T. Joubaud^a, V. Zimpfer^a, A. Garcia^b et C. Langrenne^b

^aISL, 5 rue du Général Cassagnou, 68301 Saint Louis, France

^bLMSSC, CNAM, 2 rue Conté, 75003 Paris, France

thomas.joubaud@isl.eu



LE MANS

Dans de nombreuses situations civiles et militaires, il est important que l'auditeur soit à la fois protégé des bruits dangereux et en même temps non isolé de son environnement sonore. Les systèmes tactiques de communication et protection, notés TCAPS (Tactical Communication and Protective Systems), assurent une protection correcte tout en préservant l'intelligibilité. Notre étude se concentre à présent sur la conservation des performances de localisation de source sonore avec de tels protecteurs auditifs. Une expérience subjective a été menée au cours de laquelle une vingtaine d'auditeurs ont dû localiser des sources sonores sur le plan horizontal, avec et sans TCAPS. Chaque auditeur a ainsi testé six TCAPS différents. L'analyse des résultats montre que des différences significatives de performance de localisation existent, principalement entre les différents types de protection (bouchons d'oreille ou casque). Toutefois, le port de TCAPS ne semble pas avoir d'impact sur le temps de réponse des auditeurs. De manière générale, les TCAPS, quel que soit leur type, dégradent la capacité des auditeurs à localiser les sons de deux façons distinctes : la diminution de la précision de localisation et l'augmentation des confusions avant/arrière. Cette dernière peut être expliquée par une détérioration des indices spectraux, induits par la diffraction de l'onde sonore sur le torse, la tête et les oreilles de l'auditeur, et permettant, en condition d'écoute normale, de lever les ambiguïtés avant/arrière entraînées par les différences interaurales de temps et d'intensité. Cette étude a pour but principal de servir de base à la validation d'une méthode objective d'estimation de la dégradation des performances de localisation causée par les systèmes tactiques de communication et protection.

1 Introduction

Sur le champ de bataille, les soldats sont soumis à de dangereux bruits, impulsionnels ou continus. La protection de leur audition est donc cruciale. Les protections individuelles contre le bruit (PICB) actuelles sont divisées en deux catégories : celles dont l'atténuation est fixe, comme les boules Quies®, et celles dont l'atténuation dépend du niveau sonore, appelées systèmes tactiques de communication et protection, notés TCAPS (Tactical Communication and Protective Systems). Ces deux types de protection auditive assurent une protection suffisante contre le bruit, mais la conservation de la perception et de l'interprétation de l'environnement sonore est aussi importante. En effet, si les PICB empêchent les soldats de détecter les menaces ou de suivre les ordres, leur survivabilité est compromise et ils pourraient même choisir de ne pas porter leurs protections auditives [1]. Dans le contexte de l'amélioration des PICB du point de vue de la survivabilité, notre travail se concentre sur la conservation de la capacité à localiser les sources sonores lorsqu'elles sont utilisées.

De précédentes études ont montré que porter des protecteurs auditifs, quel que soit leur type, dégrade les performances de localisation sonore des auditeurs, principalement à travers l'augmentation des confusions avant/arrière et des erreurs d'élévation [2, 3]. De manière générale, cette dégradation est davantage marquée lorsque l'auditeur porte un casque plutôt que des bouchons d'oreilles, et l'est encore plus s'il porte à la fois des bouchons et un casque [4]. Enfin, même s'il existe toujours une dégradation importante, la capacité à localiser les sources sonores semble mieux préservée par les TCAPS [5, 6]. Comme ils présentent de plus un avantage face aux protections à atténuation fixe car ils préservent l'intelligibilité [7], nous ne nous intéresserons qu'aux TCAPS dans la suite.

L'évaluation des performances de localisation sonore avec protection auditive se fait généralement par l'analyse des résultats d'expériences subjectives de localisation. Ce genre d'expérience requiert un nombre important d'auditeurs et peut donc prendre beaucoup de temps. L'objectif de nos travaux est par conséquent le développement d'une méthode objective d'estimation de la dégradation de la capacité à localiser les sons induite par les TCAPS. Toutefois, pour valider cette nouvelle méthode, une comparaison est nécessaire entre ses prédictions de localisation et les

résultats d'une expérience subjective obtenus avec les mêmes TCAPS. Cet article présente donc le protocole et les résultats d'une expérience au cours de laquelle des auditeurs ont dû localiser des sources sonores dans le plan horizontal en portant six TCAPS différents. La restriction au plan horizontal a été choisie car les confusions avant/arrière pouvant être causées par les protections auditives sont plus décisives pour la survivabilité que les erreurs d'élévation.

2 Protocole expérimental

2.1 Auditeurs

20 auditeurs volontaires ont participé à cette étude, 2 femmes et 18 hommes, âgés de 24 à 53 ans (moyenne : 37 ans ; médiane : 40 ans) au moment de l'expérience. Leur audition a été vérifiée par un test d'audiométrie de Békésy à fréquence fixe, pour les octaves de 125 Hz à 8 kHz. Tous les auditeurs présentent une audition normale pour leur âge [8].

2.2 Systèmes tactiques de communication et protection

Les systèmes tactiques de communication et protection peuvent être passifs ou actifs. La variation de l'atténuation en fonction du niveau sonore des TCAPS dits passifs provient d'un filtre exploitant la non-linéarité acoustique d'un orifice. Ce type de filtre ne se trouve que sur des bouchons d'oreilles alors appelés bouchons non-linéaires. Dans le cas des TCAPS actifs, la variation d'atténuation est obtenue par filtrage électronique du signal sonore arrivant au protecteur et retransmis à l'oreille. Ces systèmes peuvent être à la fois adaptés aux bouchons d'oreilles et aux casques.

Il est donc intéressant dans cette expérience de comparer les modifications des performances de localisation sonore induites par des TCAPS passifs et actifs. La Figure 1 représente les six TCAPS choisis. P1 et P2 sont des bouchons d'oreilles en polymère à triple ailette, le premier incluant un filtre non-linéaire ISL [9] et le second un filtre Hocks-Noise-Braker®. P3 et P4 sont des bouchons d'oreilles avec système talk-through. P3 possède une atténuation automatique du bruit en fonction du niveau sonore alors que l'atténuation de P4 est choisie par l'utilisateur (les bruits impulsionnels à fort niveau sont cependant automatiquement



FIGURE 1 – Systèmes tactiques de communication et protection

atténués). Enfin P5 et P6 sont deux casques avec système talk-through et atténuation automatique du bruit. Tous les systèmes électroniques possèdent un réglage d'amplification du signal sonore, qui sera toujours mis au minimum dans cette expérience.

2.3 Dispositif

Pour cette expérience subjective, nous utilisons le dispositif de localisation sonore de l'ISL (Figure 2). Dans une cabine d'audiométrie, le sujet est assis, sa tête placée au centre d'un cercle de 2,60 mètres de diamètre composé de 8 haut-parleurs espacés de 45°. Ces derniers sont cachés par un rideau afin de supprimer tout indice visuel de localisation des sources sonores. Une technique de stéréophonie panoramique permet de produire des sources sonores virtuelles entre les haut-parleurs [10]. Ainsi le dispositif permet d'avoir à disposition 16 sources sonores différentes espacées de 22.5°, de 0° à 337.5°.

Le stimulus émis par les sources sonores réelles et virtuelles est un burst de bruit blanc de 280 ms à un niveau de 70 dB(SPL). Nous avons choisi un bruit à large bande fréquentielle afin que tous les indices de localisation soient disponibles. En effet, il a été montré qu'un bruit à bande étroite peut être localisé par des sujets à une position dépendante de sa fréquence centrale et indépendante de sa position réelle [11]. Le bruit de fond de la cabine, lorsque tous les appareils sont en marche, est d'environ 30 dB(A).

2.4 Procédure

Lorsqu'un son est émis, l'auditeur indique la direction dans laquelle il l'a perçu à l'aide d'un écran tactile. La position réelle de la source, la réponse de l'auditeur et son temps de réponse (temps entre l'émission du son et la



FIGURE 2 – Dispositif expérimental

réponse) sont enregistrés. Le choix dans la position perçue est forcé, c'est-à-dire que le sujet ne peut pas proposer une autre direction qu'une des 16 possibles. L'ordre de passage des sources sonores est aléatoire, à la seule condition que chacune d'entre elles passe exactement 5 fois. Une série de localisation est donc composée de 80 sons.

Afin de faciliter la prise en main du dispositif de localisation sonore, une séquence d'entraînement a été introduite. L'auditeur réalise tout d'abord un « tour d'horizon » pour se familiariser avec le stimulus sonore et l'écran tactile. Il s'agit d'une série de 32 sons dont la provenance est contrôlée par l'auditeur lui-même. La séquence se poursuit avec une série d'entraînement à la localisation de 32 sons (2 par position), similaire à une série en condition d'écoute normale, à l'exception que le dispositif indique la bonne position sur l'écran tactile après la réponse de l'auditeur.

En raison du temps requis par l'expérience et pour éviter l'émergence d'effets de fatigue, chaque auditeur a participé à trois séances sur trois jours différents. Lors de la première séance, le test d'audiométrie est effectué, suivi d'une séquence d'entraînement. Ensuite, l'auditeur accomplit une série de localisation en condition d'écoute normale, puis 4 séries en condition d'écoute avec TCAPS. La durée totale de cette première séance est d'environ 50 minutes. Le déroulement des deuxième et troisième séances est similaire au précédent, excepté que l'audiométrie n'est pas refaite. Ces deux séances durent donc moins longtemps, à savoir environ 35 minutes.

En conclusion, chaque auditeur effectue au total 15 séries de localisation, 3 en condition d'écoute normale et 2 avec chacun des 6 TCAPS. L'ordre de passage des protecteurs est aléatoire, à la condition qu'aucun d'entre eux ne passe deux fois dans la même séance et que tous aient été utilisés avant de les tester une seconde fois.

2.5 Analyse des données

Les données des tests de localisation sonore de tous les auditeurs sont analysées dans le but de légitimer l'existence d'effets de différents facteurs sur les performances de localisation et le temps de réponse. Les TCAPS utilisés représentent le principal facteur étudié, mais nous pourrions par exemple aussi nous intéresser à l'effet de l'âge des auditeurs. L'influence de ces facteurs est déterminée par

une analyse de variance (ANOVA), en général à mesures répétées. Le résultat d'une ANOVA est donné sous la forme de la statistique F calculée, de la p-valeur associée et des degrés de liberté de l'analyse. Ces derniers sont corrigés si nécessaire en suivant la procédure de Greenhouse-Geisser [12]. Si un effet significatif d'un facteur est révélé par l'ANOVA, une analyse post-hoc est réalisée pour comparer les niveaux de ce facteur deux-à-deux. Dans ce cas, un test HSD de Tukey, ou test de la différence franchement significative, est effectué.

3 Résultats

Les performances de localisation sonore des auditeurs avec et sans TCAPS sont analysées selon quatre aspects. Tout d'abord, les nombres de bonnes réponses et de localisations correctes sont abordés pour identifier les principales disparités pouvant exister entre les TCAPS. Les différents types d'erreurs de localisation commis par les auditeurs sont ensuite étudiés, puis le temps de réponse à l'exercice de localisation est considéré. Pour finir, les éventuelles différences entre les auditeurs en fonction de leur âge sont identifiées.

3.1 Performances de localisation

Les réponses des auditeurs au test de localisation ne sont pas interprétées que comme bonnes ou mauvaises, mais également en terme de bonne localisation. Une réponse dans le bon quadrant à plus ou moins 22.5° de la position réelle est ainsi considérée comme une localisation correcte. Toute autre réponse dans le bon quadrant représente une erreur de localisation d'au moins 45° et est appelée erreur grossière. Les réponses dans les autres quadrants sont, suivant le quadrant en question, des erreurs avant/arrière, gauche/droite ou mixtes (à la fois gauche/droite et avant/arrière). Il est important de noter que les positions 0°, 90°, 180° et 270° appartiennent chacune à deux quadrants.

Pour chaque TCAPS et pour la condition d'écoute normale, les résultats des auditeurs sur les différentes séances sont moyennés. Le Tableau 1 répertorie les moyennes sur tous les auditeurs des nombres de bonnes réponses et d'erreurs pour chaque condition d'écoute. Quand aucune protection auditive n'est portée, les performances de localisation sonore sont excellentes : environ 60% de bonnes réponses et 96% de bonnes localisations. Les quelques erreurs subsistantes sont essentiellement des erreurs grossières et avant/arrière. En revanche, une augmentation du nombre d'erreurs avant/arrière et, à moindre mesure, du nombre d'erreurs grossières est constatée dès qu'un TCAPS est utilisé. Elle engendre une chute du nombre de bonnes localisations et une détérioration encore plus importante du nombre de bonnes réponses. Cela se traduit par une réduction de la précision, définie comme le rapport du nombre de bonnes réponses sur le nombre de bonnes localisations, qui décroît de 63% sans TCAPS à 45% pour P6. Pour finir, ces résultats montrent aussi les différences existantes entre les différents types de TCAPS. La multiplication des erreurs de localisation est manifestement supérieure dans le cas des casques talk-through qu'avec les bouchons d'oreilles. Les différences entre bouchons non-linéaires et talk-through sont toutefois moins marquées, particulièrement entre P1, P2 et P3.

Afin d'appuyer les différentes observations faites sur le Tableau 1, un examen statistique des performances de localisation est effectué. Une analyse de variance à mesures répétées confirme un effet significatif de la condition d'écoute sur le nombre de bonnes localisations [$F_{(6,114)} = 52.09, p < 0.001$]. L'analyse post-hoc de ces données par un test HSD de Tukey ne révèle aucune différence significative entre P1, P2 et P3, entre P3 et P4, ainsi qu'entre P5 et P6. En dehors du fait que les résultats de P3 soient similaires à ceux de P1 et P2, les TCAPS sont regroupés par type et peuvent donc être classés en fonction de leur dégradation du nombre de bonnes localisations : les casques talk-through affectent plus la localisation que les bouchons talk-through, qui eux-mêmes entraînent de moins bonnes performances que les bouchons non-linéaires.

De la même manière, l'étude du nombre de bonnes réponses confirme aussi un effet significatif de la condition d'écoute [$F_{(6,114)} = 37.06, p < 0.001$]. D'après le test HSD de Tukey, les groupes de protecteurs présentant des moyennes homogènes sont cette fois P1-P2, P1-P3, P3-P4-P5 et P5-P6. Ces regroupements valident le classement précédent des TCAPS selon leur type. Mais pour identifier la cause de cette hétérogénéité entre les protecteurs auditifs, les différents types d'erreurs engendrées par ceux-ci doivent être étudiés.

3.2 Étude des erreurs

L'analyse de variance et les tests post-hoc peuvent aussi être appliqués aux nombres d'erreurs grossières, avant/arrière, gauche/droite et mixtes. Tout d'abord, le fait de porter un TCAPS n'a aucun effet significatif sur le nombre d'erreurs gauche/droite [$F_{(2,63,49,94)} = 2.47, p = 0.08$] mais n'est pas négligeable dans le cas des erreurs mixtes [$F_{(2,72,51,7)} = 4.02, p < 0.05$], principalement à cause de différences significatives entre la condition sans TCAPS et P6, et entre P2 et P6. Les p-valeurs associées à ces deux ANOVA rendent toutefois difficiles ces interprétations. On retiendra que les variations entre les différents TCAPS des nombres d'erreurs gauche/droite et mixte sont négligeables face aux autres types d'erreurs (cf. Tableau 1).

En fait, les différences constatées précédemment sur le nombre de bonnes localisations en fonction du protecteur utilisé se répercutent sur les erreurs grossières [$F_{(6,114)} = 17.24, p < 0.001$] et sur les erreurs avant/arrière [$F_{(6,114)} = 43.13, p < 0.001$]. La dégradation des performances de localisation sonore induite par les TCAPS est donc finalement due au décuplement de ces deux formes d'erreur, principalement les erreurs avant/arrière. Les Figures 3a et 3b représentent la distribution moyenne de ces erreurs en fonction de la position. Pour éviter de surcharger les figures, les résultats sont moyennés par type de TCAPS.

La Figure 3a montre que dès qu'un protecteur est utilisé, le nombre d'erreurs avant/arrière augmente. Pour les bouchons non-linéaires, cette augmentation se traduit par un pic à 180° qui va ensuite s'élargir pour les systèmes électroniques. Les plus importantes confusions avant/arrière surviennent pour les positions frontales lorsque les casques sont portés. Pour les bouchons en revanche, le nombre d'erreurs avant/arrière reste stable pour ces positions.

L'évolution du nombre d'erreurs grossières de la Figure 3b est en revanche beaucoup moins importante que celle des erreurs avant/arrière. L'augmentation de ces erreurs

TABLEAU 1 – Nombres moyens de bonnes réponses et d’erreurs pour les 7 TCAPS (sur 80)

| TCAPS | Sans | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Type de réponse | | | | | | | |
| Bonnes réponses | 48.6 | 37.6 | 38.1 | 32.1 | 30.9 | 26.6 | 23.1 |
| Bonnes localisations | 76.5 | 68.3 | 68.2 | 65 | 61.7 | 54.4 | 51.2 |
| Erreurs grossières | 1.4 | 3.5 | 3.7 | 4.4 | 5.8 | 7.3 | 7.2 |
| Erreurs avant/arrière | 2 | 7.7 | 8 | 10.1 | 11.9 | 17.4 | 20.3 |
| Erreurs gauche/droite | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.8 |
| Erreurs mixtes | 0 | 0.1 | 0 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.5 |

liée à l’utilisation des TCAPS, détectée sur le Tableau 1 et confirmée par l’ANOVA, est néanmoins observée. Elles émergent sur les positions avant, arrière, gauche et droite pour les bouchons non-linéaires et sont amplifiées pour les bouchons talk-through. Dans le cas des casques talk-through, les erreurs grossières sont concentrées en majorité sur les positions multiples de 45°, surtout à l’arrière, résultant en un diagramme polaire en forme d’étoile. Cette forme provient bien d’une plus grande difficulté à localiser pour ces positions et non du fait que les sources sonores à ces positions sont des sources réelles puisqu’il n’existe aucune différence de performance de localisation entre les sources réelles et virtuelles [10].

3.3 Temps de réponse

Dans cette nouvelle partie, le temps de réponse des auditeurs au test de localisation sonore est étudié. Le diagramme à barres de la Figure 4 représente le temps de réponse moyen des auditeurs à la fois en fonction du TCAPS utilisé et en fonction de la justesse de la réponse. Tout d’abord, cette figure montre que ce temps est toujours plus élevé pour la condition d’écoute sans TCAPS. En revanche, les différences entre les différents protecteurs paraissent très faibles. Ensuite, quelque soit la condition d’écoute, le temps de réponse est systématiquement plus faible si l’auditeur répond correctement à l’exercice de localisation que s’il commet une faute.

Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs intra-sujets dévoile premièrement un effet significatif de la condition d’écoute sur le temps de réponse [$F_{(6,114)} = 7.74, p < 0.001$]. L’analyse post-hoc montre que cet effet est uniquement dû à la différence entre la condition d’écoute normale et les conditions avec TCAPS, comme observé précédemment sur la Figure 4. Par conséquent, le temps de réponse des auditeurs est plus faible lorsqu’il porte un TCAPS que lorsqu’il n’en porte pas. Deuxièmement, le fait que la justesse de la réponse présente aussi un effet important [$F_{(1,19)} = 31.4, p < 0.001$] permet de valider l’observation selon laquelle le temps de réponse est plus faible si la réponse est juste. Pour finir, cette analyse statistique ne décèle aucun effet d’interaction entre les deux facteurs considérés [$F_{(6,114)} = 0.74, p = 0.61$].

3.4 Effet de l’âge

Les auditeurs ont été séparés en deux groupes égaux représentant les personnes de moins de 40 ans et celles de plus de 40 ans. Le nombre moyen de bonnes localisations

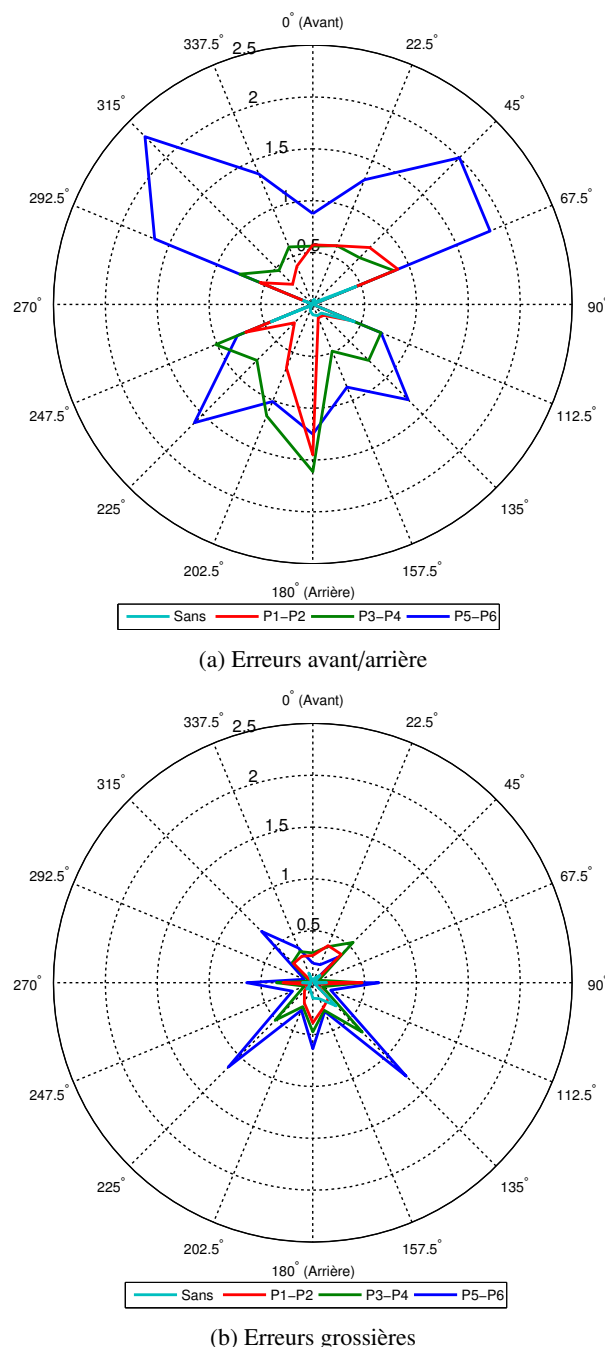


FIGURE 3 – Nombres moyens (sur 5) d’erreurs (a) avant/arrière et (b) grossières par position. « Sans » désigne la condition d’écoute normale, « P1-P2 » les bouchons non-linéaires, « P3-P4 » les bouchons talk-through et « P5-P6 » désigne les casques talk-through.

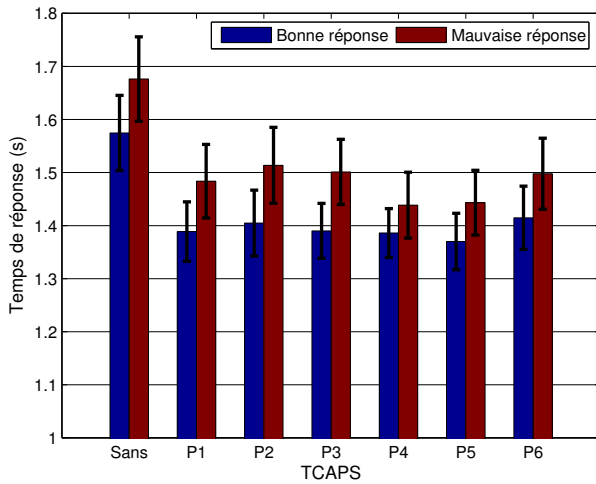


FIGURE 4 – Temps de réponse moyen pour les bonnes et mauvaises réponses dans chaque condition d'écoute. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standard

en fonction de l'âge pour chaque condition d'écoute est représenté sur la Figure 5. Il ne semble pas y avoir une différence importante entre les deux groupes d'auditeurs de manière générale. Toutefois, dans le cas précis de P5, une baisse du nombre de bonnes localisations paraît émerger avec l'augmentation de l'âge. Une ANOVA à mesures répétées, à un facteur inter-sujet (l'âge) et un facteur intra-sujet (les TCAPS) dévoile que l'âge des auditeurs n'a aucun effet sur le nombre de bonnes localisations [$F_{(1,18)} = 0.07, p = 0.8$]. Un effet significatif d'interaction entre les deux facteurs est en revanche remarqué [$F_{(6,108)} = 2.29, p < 0.05$]. Cependant, une analyse plus poussée montre que cet effet ne provient pas de différences de résultat entre les deux groupes d'auditeurs pour un protecteur particulier, mais de différences entre les résultats d'un groupe pour un TCAPS et les résultats d'un groupe (potentiellement le même) pour un autre TCAPS, ce qui n'est pas pertinent.

De la même manière, aucun effet significatif de l'âge n'est découvert sur le temps de réponse [$F_{(1,18)} = 0.06, p = 0.8$], de même qu'aucun effet d'interaction entre les TCAPS et l'âge n'est démontré [$F_{(6,108)} = 0.29, p = 0.94$].

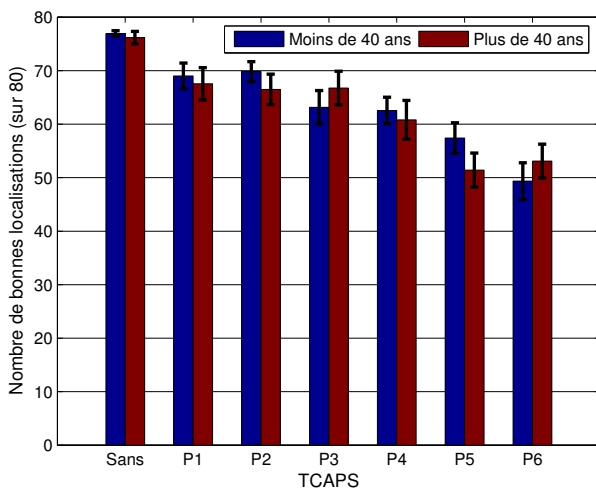


FIGURE 5 – Nombre moyen de bonnes localisations en fonction de l'âge pour chaque condition d'écoute. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standard

4 Discussion et conclusion

En considérant tout d'abord le temps de réponse des auditeurs, aucune différence conséquente n'est dévoilée entre les TCAPS. Seul le temps de réponse dans la condition d'écoute normale est plus élevé que dans les autres conditions. La cause de cet effet est probablement le fait que chaque jour, la condition d'écoute sans TCAPS ait été testée en première. Il aurait donc fallu l'inclure dans la randomisation de l'ordre de passage des TCAPS, mais cet effet peut aussi être la marque d'une séquence d'entraînement trop courte. Nos observations conduisent tout de même à la conclusion que le temps de réponse augmente lorsque l'auditeur commet une erreur de localisation. La différence avec l'analyse de [13], qui ne trouve pas cette différence entre bonne et mauvaise réponse, peut être due à une différence de protocole expérimental.

La cause principale de la dégradation des performances de localisation par les TCAPS dans le plan horizontal est l'augmentation des erreurs avant/arrière. Nous avons aussi noté une réduction de la précision et une évolution significative du nombre d'erreurs grossières dans le bon quadrant. Le nombre d'erreurs gauche/droite et mixtes reste quant à lui anecdotique. Ces résultats sont globalement retrouvés dans d'autres études [13, 14], même si la restriction au plan horizontal est enlevé [6]. Dans ce cas toutefois, un nombre d'erreurs gauche/droite non négligeable peut être trouvé [15].

L'interprétation de nos résultats doit passer par une revue des mécanismes de localisation. Pour trouver la position d'une source sonore, un auditeur se base sur plusieurs indices. Les différences de temps d'arrivée de l'onde acoustique et de niveau sonore entre les deux oreilles constituent respectivement les différences interaurales de temps (ITD) et d'intensité (ILD) [16] et contribuent majoritairement à la localisation azimutale, dans la limite des surfaces iso-ITD et iso-ILD appelées cônes de confusion [11]. Les confusions avant/arrière et les erreurs d'élévation engendrées par ces derniers sont résolues par les indices spectraux résultant du filtrage directionnel du signal sonore reçu au tympan par le torse, la tête et l'oreille externe de l'auditeur [17].

L'augmentation substantielle des erreurs avant/arrière observée lorsque les auditeurs portent des TCAPS doit donc être causée par la dégradation des indices spectraux. De même, la stabilité du faible nombre d'erreurs gauche/droite et mixtes serait cohérent avec la conservation des différences interaurales. Dans [18], les fonctions de transfert contenant les indices de localisation, appelées Head-Related Transfer Functions (HRTF), sont mesurées sur une tête artificielle avec et sans TCAPS (les P1, P2, P3, P5 et P6 de notre étude). Cette étude montre que les protecteurs ont effectivement détérioré les indices spectraux de manière conséquente tout en conservant les ILD et les ITD, à l'exception des casques talk-through qui ont aussi tendance à réduire les ILD. De plus, une mesure de l'effet des TCAPS sur les HRTF est proposée et permet de retrouver un classement des protecteurs similaire à celui de notre expérience subjective : les bouchons non-linéaires présentent les performances de localisation les plus proches des performances en condition d'écoute normale, suivis des bouchons talk-through, parmi lesquels P3 entraîne des résultats très proches des bouchons précédents. Enfin, les casques talk-through engendrent les

plus mauvaises performances de localisation sonore.

La forte corrélation entre les résultats de cette expérience subjective de localisation avec TCAPS et la comparaison des HRTF mesurées sur une tête artificielle dans [18] constitue une bonne avancée pour le développement d'une méthode objective de prédiction des performances de localisation sonore avec protection auditive. Cette méthode permettra d'évaluer des améliorations des TCAPS actuels sans avoir recours à une expérience subjective. Nous prévoyons ainsi d'étudier les différences de performances de localisation en fonction de la fréquence de coupure des systèmes électroniques, de la directivité de leurs microphones, ou encore en fonction de la longueur des filtres des bouchons non-linéaires.

Références

- [1] Z. L. BEVIS, H. D. SEMERARO, R. M. van BESOUW, D. ROWAN, B. LINETON et A. J. ALLSOPP : Fit for the frontline ? A focus group exploration of auditory tasks carried out by infantry and combat support personnel. *Noise & Health*, **16**(69):127–135, 2014.
- [2] R. L. MCKINLEY : Communication and localization with hearing protectors. In *RTO HFM Lecture Series on "Damage Risk from Impulse Noise"*, Maryland, USA, 2000.
- [3] B. D. SIMPSON, R. S. BOLIA, R. L. MCKINLEY et D. S. BRUNGART : The impact of hearing protection on sound localization and orienting behavior. *Human Factors*, **47**(1):188–198, 2005.
- [4] D. S. BRUNGART, A. J. KORDIK, B. D. SIMPSON et R. L. MCKINLEY : Auditory localization in the horizontal plane with single and double hearing protection. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, **74**(9): 937–946, 2003.
- [5] V. ZIMPFER, D. SARAFIAN, K. BUCK et P. HAMERY : Spatial localization of sounds with hearing protection devices allowing speech communication. In *Proc. Acoustics Conference, Nantes, France*, 2012.
- [6] V. ZIMPFER et D. SARAFIAN : Impact of hearing protection devices on sound localization performance. *Frontiers in Neuroscience*, **8**(135), 2014.
- [7] J. A. NORIN, D. C. EMANUEL et T. R. LETOWSKI : Speech intelligibility and passive, level-dependent earplugs. *Ear & Hearing*, **32**(5):642–649, 2011.
- [8] Norme ISO 7029 :2000 – Acoustique - Distribution statistique des seuils d'audition en fonction de l'âge, 2000.
- [9] P. HAMERY, A. DANCER et G. EVRARD : Patent US 6068079 A : Acoustic valve capable of selective and non-linear filtering of sound, 2000.
- [10] G. BLANCK, V. ZIMPFER et T. JOUBAUD : Creation of virtual sound sources for subjective localization tests. Rapport technique ISL-R 124/2015, 2015.
- [11] J. BLAUERT : *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press, 1983.
- [12] A. MÉOT : *Analyse de variance : intuition, pratique, théorie*. Ellipses Editions, 2014.
- [13] E. L. CARMICHEL, F. P. HARRIS et B. H. STORY : Effects of binaural electronic hearing protectors on localization and response time to sounds in the horizontal plane. *Noise & Health*, **9**(37):83–95, 2007.
- [14] S. M. ABEL, S. TSANG et S. BOYNE : Sound localization with communications headsets : Comparison of passive and active systems. *Noise & Health*, **9**(37):101–107, 2007.
- [15] D. S. BRUNGART et B. W. HOBBS : A comparison of acoustic and psychoacoustic measurements of pass-through hearing protection devices. In *Proc. IEEE WASPAA, New Paltz, NY, USA*, 2007.
- [16] W. M. HARTMANN : How we localize sound. *Physics Today*, **52**(11):24–29, 1999.
- [17] J. BLAUERT : Sound localization in the median plane. *Acustica*, **22**(4):205–213, 1969.
- [18] T. JOUBAUD, V. ZIMPFER, A. GARCIA et C. LANGRENNE : Degradation of front-back spectral cues induced by tactical communication and protective systems. In *Proc. Euronoise Conference, Maastricht, The Netherlands*, 2015.