

CFA/VISHNO 2016

La perception de signaux d'alarme sous protecteurs auditifs dans un contexte ferroviaire

J.P. Gettliffe^a, J.P. Arz^b et F. Dubois^c

^aSNCF - Agence d'Essai Ferroviaire, 21, avenue du Président Allende, 94400 Vitry-Sur-Seine, France

^bINRS, 1, rue du Morvan, 54519 Vandoeuvre-Les-Nancy, France

^cSNCF - Direction Innovation et Recherche, 40, avenue des Terroirs de France, 75611 Paris, France

jean-pierre.gettliffe@sncf.fr



LE MANS

Le transport ferroviaire soumet certains opérateurs à des niveaux d'exposition sonore élevés qui peuvent nécessiter le port de protecteurs auditifs contre le bruit. Dans certains métiers, des signaux sonores sont diffusés pour provoquer une action de l'opérateur afin d'éviter la survenue d'une situation potentiellement à risque, tant pour l'opérateur lui-même qu'en termes de sécurité de l'exploitation ferroviaire ou de perturbation du trafic. L'enjeu du port de protecteurs auditifs est donc double : apporter une protection efficace de l'ouïe et garantir la sécurité en assurant l'audibilité des signaux de danger. Afin de pouvoir évaluer l'influence du port de protecteurs auditifs dans de multiples situations acoustiques et auprès de nombreux opérateurs de la SNCF, des tests psychoacoustiques en laboratoire et des méthodes d'analyse spécifiques ont été mis au point en collaboration avec le CNRS, l'INRS et les services de prévention de la SNCF. Trois métiers ont été considérés : les conducteurs de trains, les agents chargés de la maintenance des voies ferrées et les agents travaillant en gare à proximité des voies de chemins de fer. Les méthodes et les résultats sont présentés ainsi que leurs limites vis-à-vis des conditions réelles de travail et du statut auditif des opérateurs porteurs de protecteurs auditifs.

1 Cadre de l'étude

En milieu industriel bruyant, la perception de signaux acoustiques indiquant un danger est impérative pour assurer la sécurité des travailleurs. Cette problématique se pose particulièrement lorsque des protecteurs individuels contre le bruit (PICB) sont portés car ils pourraient nuire à la perception des signaux avertisseurs de danger. L'enjeu du port de PICB est donc double : apporter une protection efficace de l'ouïe et garantir la sécurité en assurant l'audibilité des signaux de danger.

A la SNCF, les textes réglementaires ont toujours interdit le port de protecteurs auditifs (PICB) lorsque que les travailleurs étaient en risque ferroviaire (risque de heurt avec un train). Aujourd'hui, les évolutions techniques des protecteurs auditifs ont amené la SNCF à remettre en cause le dogme de non-port de PICB en risque ferroviaire et à rechercher des solutions compatibles avec la perception de signaux sonores ou de la parole.

Cet article décrit les méthodes et les résultats des tests auditifs qui ont été mis en œuvre en laboratoire auprès d'agents de la SNCF dans le but d'évaluer l'influence du port de PICB sur la perception de signaux sonores caractéristiques de 3 métiers ferroviaires.

2 Protecteurs auditifs et signaux avertisseurs de danger

De manière générale, l'effet du port de PICB sur la perception de signaux sonores est difficile à évaluer car il dépend de nombreux paramètres dont les niveaux et spectres respectifs du signal et du bruit ambiant, le statut auditif des individus et les affaiblissements du PICB ; tous ces paramètres étant variables en fonction de la fréquence.

Dans la pratique, on étudie l'influence du port d'un PICB en comparant les seuils masqués avec et sans PICB. Le seuil masqué d'un signal de danger est, dans un bruit ambiant donné, le niveau sonore minimal pour qu'il soit entendu. Lorsque le seuil masqué avec protecteur est supérieur au seuil masqué sans protecteur, le port du PICB dégrade la perception (élévation des seuils). Dans le cas inverse, le port du PICB améliore la perception.

Les différentes études consacrées à l'influence du port de PICB ont montré qu'il existe trois phénomènes distincts à l'origine de l'influence du PICB : deux phénomènes permettent d'expliquer la dégradation et un phénomène permet d'expliquer l'amélioration de la perception des signaux de danger.

Tout d'abord, la perception peut être dégradée parce que les atténuations apportées par le PICB s'ajoutent aux pertes auditives de l'individu et augmentent les seuils d'audition (voir par exemple la revue bibliographique de Wilkins et Martin [1] ou le « Cas 1 » d'élévation des seuils dans [2]). Pour des travailleurs qui n'ont pas (ou peu) de pertes auditives, cette dégradation est limitée à des niveaux sonores relativement faibles. Par contre, pour des travailleurs qui ont des pertes auditives plus importantes, la dégradation peut s'étendre à des niveaux beaucoup plus élevés ; en particulier dans les hautes fréquences où à la fois les pertes auditives [3] et les atténuations des PICB sont habituellement les plus élevées et vont se cumuler.

Le deuxième phénomène qui explique pourquoi le port d'un PICB peut dégrader la perception est lié à la modification du masquage fréquentiel. Les deux principales caractéristiques du masquage fréquentiel sont (1) qu'un son d'une fréquence donnée masque davantage les fréquences supérieures que les fréquences inférieures et (2) que lorsque le niveau du son masquant augmente, le masquage s'étend de manière non-linéaire à un domaine fréquentiel de plus en plus large (ce phénomène s'appelle en anglais « the upward spread of masking », voir par exemple le modèle de Moore dans la norme ANSI S3.4 [4]). Ces caractéristiques expliquent pourquoi la perception d'un signal de danger peut être dégradée dans le cas d'un bruit ambiant qui domine dans les basses fréquences et d'un protecteur qui atténue davantage dans les hautes que dans les basses fréquences (ce qui représente la majorité des PICB). En effet, d'une part le masquage des basses vers les hautes fréquences est faiblement modifié par les faibles atténuations en basses fréquences du PICB ; d'autre part les composantes hautes fréquences du signal de danger sont fortement atténuées sous le PICB si bien qu'elles deviennent masquées (voir le « Cas 2 » d'élévation des seuils dans [2]). Pour éviter cette dégradation, des PICB à atténuations uniformes en fonction de la fréquence sont conseillés dans plusieurs normes [5, 6].

D'un autre côté, le fait que le masquage s'étend de manière non-linéaire à un domaine fréquentiel de plus en plus large lorsque le niveau du son masquant augmente peut également expliquer pourquoi le port d'un PICB améliore la perception des signaux d'alarme. En effet, les atténuations apportées par le PICB permettent de faire travailler l'oreille à des niveaux sonores plus faibles pour lesquels les phénomènes de masquage sont donc moins importants (on dit alors que la sélectivité fréquentielle est améliorée car les filtres auditifs sont moins larges [4]). On s'attend en particulier à des améliorations lorsque les affaiblissements du PICB sont uniformes et/ou en présence de bruits qui ne dominant pas en basses fréquences.

En résumé, l'élévation des seuils due au port de PICB est plus susceptible d'affecter les hautes fréquences que les basses fréquences et ce phénomène est d'autant plus important que les affaiblissements du PICB ne sont pas uniformes en fonction de la fréquence.

3 Objectif et méthodes

3.1. Objectif

L'objectif de cette étude était d'étudier l'influence du port de PICB sur l'audibilité de signaux sonores ferroviaires pour 3 métiers spécifiques : les agents de maintenance des voies ferrées, les conducteurs de trains et les agents travaillant auprès des voyageurs sur les quais des gares (appelés « agents à quai » dans la suite).

3.2. Méthodologie

Pour chacun des 3 métiers considérés, la méthode mise en œuvre comprend 3 étapes : (1) le choix des bruits masquants et des signaux de danger à enregistrer en situation réelle de travail ; (2) la mesure, en laboratoire, des seuils masqués des signaux avec et sans PICB sur un panel d'auditeurs ; (3) la comparaison des seuils masqués (avec et sans PICB) grâce à des analyses statistiques. Les 3 étapes sont détaillées ci-après.

Etape 1 : Le choix des bruits ambiants s'est fait en privilégiant les niveaux sonores les plus élevés et en recherchant des spectres différents (qui conduisent à des phénomènes de masquage différents). Les signaux sonores à percevoir sont des signaux d'alarme, d'avertissement ou d'information nécessaires à la tenue du poste.

Etape 2 : Les seuils masqués de différents signaux dans un bruit ambiant de niveau fixe ont été mesurés grâce à la méthode des stimuli constants, développée et mise en œuvre par le CNRS-LMA [7]. Cette méthode permet de mesurer la fonction psychométrique qui représente, pour un bruit ambiant masquant donné, l'évolution du pourcentage de signaux entendus en fonction du niveau du signal (voir Figure 1). Pour ce faire, chaque signal est présenté à 12 niveaux différents, dans un ordre aléatoire, et chaque niveau est présenté 10 fois (soit 120 séquences sonores au total). Après chaque séquence sonore, le sujet répond simplement si « oui » ou « non » il a entendu le signal. Pour limiter la durée totale des tests, la durée du bruit ambiant est fixée à 1 seconde. La durée du signal de danger pour les tests dépend de sa durée réelle : si la durée réelle est supérieure à une seconde, seule une seconde est conservée. Si la durée réelle est inférieure à une seconde, la totalité du signal est conservée et il est centré temporellement dans la seconde de

bruit ambiant. La mesure d'un seuil masqué dure environ 4 à 5 minutes.

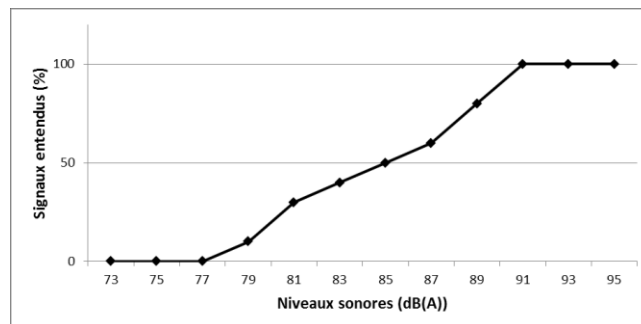


FIGURE 1 - Exemple de fonction psychométrique mesurée pour un auditeur. Seuil masqué à 50% : 85 dB(A). Seuil masqué à 100% : 91 dB(A).

A partir de la fonction psychométrique mesurée pour un auditeur, les deux valeurs retenues sont : (1) le niveau le plus bas à partir duquel 100% des signaux ont toujours été entendus (appelé seuil à 100% dans la suite) et (2) le niveau pour lequel 50% des signaux ont été entendus (appelé seuil à 50% dans la suite). Ce niveau est obtenu soit directement soit par interpolation linéaire entre les deux niveaux qui encadrent la détection à 50%.

Etape 3 : Pour caractériser les seuils de détection d'un groupe de sujets, on calcule la moyenne et l'écart type sur l'ensemble du groupe de ces seuils à 50% et 100% ; puis on calcule la différence entre les seuils moyens avec PICB et les seuils moyens sans PICB. Enfin, pour évaluer si les seuils avec PICB sont statistiquement différents des seuils sans PICB, des tests de rangs de Wilcoxon [8] ont été effectués. Il est en effet préférable de réaliser des tests de Wilcoxon plutôt que des tests de Student car les répartitions ne suivent pas toujours une loi normale (cependant, dans la grande majorité des cas, la même significativité a été trouvée avec les deux tests).

4 Caractéristiques des tests psychoacoustiques

4.1. Signaux

Au total, 36 situations sonores (une situation sonore = un bruit ambiant + un signal d'alarme) ont été testées pour l'ensemble des 3 métiers.

Pour les agents de maintenance (15 situations = 3 bruits × 5 alarmes), les 3 bruits ambiants testés (N1 à N3) sont répartis de manière relativement uniforme sur l'ensemble du spectre (voir Figure 2). Les bruits N1 et N2 correspondent à des opérations de bourrage du ballast (N1 à «bourrage mécanique» et N2 à «bourrage manuel»). Le troisième bruit ambiant correspond au bruit d'une tirefonneuse (machine servant à visser ou dévisser les tirefonds dans les traverses). Les 5 signaux d'alarme sont tous des sons multi-fréquentiels composés d'une fondamentale (située entre 350 et 660 Hz) et de nombreux harmoniques.

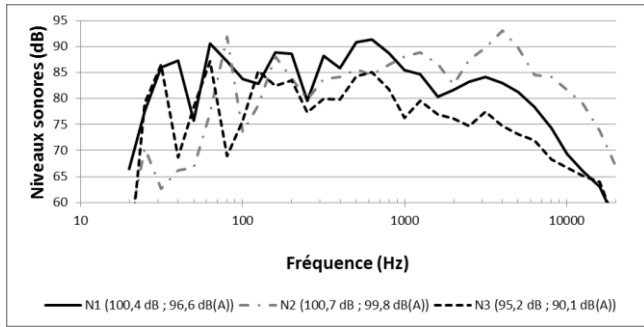


FIGURE 2 - Spectres en tiers d'octave des bruits ambiants (N1 à N3) pour les agents de maintenance.

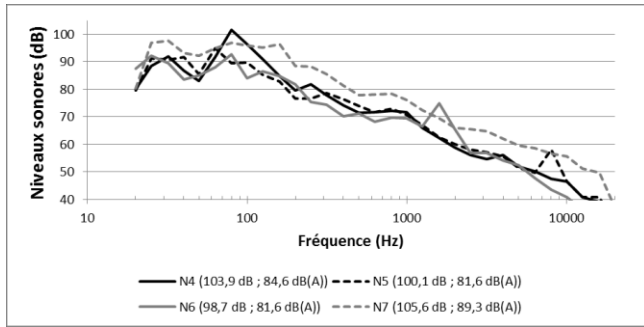


FIGURE 3 - Spectres en tiers d'octave des bruits ambiants (N4 à N7) pour les conducteurs.

Pour les conducteurs, 12 situations mettant en jeu 4 bruits ambiants et 10 signaux de danger ont été testées. Les 4 bruits ambiants (N4 à N7) sont les bruits en cabine de conduite et à vitesse maximale de 4 engins moteurs différents ; ils dominent largement en basses-fréquences (voir Figure 3). Les 10 signaux d'alarme testés sont des signaux de conduite qui avertissent le conducteur d'un évènement et qui nécessitent généralement une action de sa part. Ils sont de plusieurs types, à la fois en temporel (sons constants, pulsés, alternance de 2 tons) et en fréquentiel (sons mono-fréquentiels, multi-fréquentiels (harmoniques et non harmoniques)) ; plus de détails seront donnés à la section 5.2.

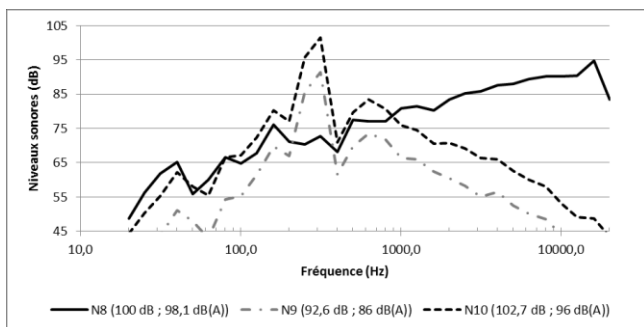


FIGURE 4 - Spectres en tiers d'octave des bruits ambiants (N8 à N10) pour les agents à quai.

Pour les agents des gares (9 situations = 3 bruits × 3 alarmes), le bruit ambiant N8 est un bruit d'échappement d'air d'une locomotive à l'arrêt ; son spectre domine en hautes fréquences (voir Figure 4). Les deux autres bruits (N9 et N10) représentent des bruits d'ambiance à proximité d'un TGV à quai. Le bruit N9 a été obtenu à partir du bruit N10 en lui soustrayant 10 dB ; par conséquent ces deux bruits ont le même spectre et il domine largement aux tiers

d'octave centrés à 250 et 315 Hz (composante à 300 Hz d'un bruit de ventilateur de TGV à quai). Les 3 signaux d'alarme sont des signaux qui avertissent les agents que des manœuvres vont avoir lieu : deux sons multi-fréquentiels harmoniques (un avertisseur aigu (S16) de fondamentale 648 Hz et un avertisseur grave (S17) de fondamentale 364 Hz) et un son de sifflet (son inharmonique (S18) dont l'énergie s'étend de 2200 à 2900 Hz).

4.2. Auditeurs

Au total, 152 agents de la SNCF extraits des 3 métiers pris en compte (85,7% d'hommes, 14,3 % de femmes) âgés de 22 à 60 ans (âge moyen 39,9 ans) ont participé aux tests. Ils ont été sélectionnés sur la base de leur audiogramme comme ayant peu de pertes auditives : pour 90,9% des agents, la perte moyenne à 500, 1000 et 2000 Hz et sur les deux oreilles est limitée à 20 dB HL (les 9,1 % d'auditeurs en dehors de cette catégorie ont été conservés dans les analyses car ils ne sont pas assez nombreux pour permettre des analyses différenciées).

4.3. Local d'écoute

Les tests psychoacoustiques se sont déroulés dans une chambre d'écoute (dimensions approximatives 4 × 3,2 × 2,7 m) aux parois non parallèles (pour éviter les ondes stationnaires) et traitée en absorption (temps de réverbération de 0,12 s à partir de 250 Hz). Le sujet est assis à environ 1,5 m de l'enceinte. Pour la calibration des signaux, la position du microphone correspond au centre de la tête du sujet.

4.4. PICB

Les protecteurs auditifs testés sont des bouchons moulés individuels (BMI) d'atténuation modérée (SNR = 17 dB). Ils ont été choisis en raison de leurs atténuations relativement uniformes en fonction de la fréquence (voir Figure 5).

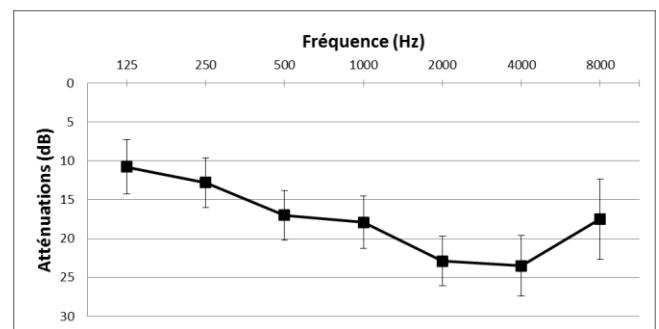


FIGURE 5 – Atténuations du protecteur auditif. Valeurs moyennes et écart-types selon la norme NF EN 352-2 [9].

5 Résultats

Les résultats présentés ci-après concernent les seuils à 50% (les effets du port de PICB sur les seuils à 100% sont similaires). Les figures 6, 8 et 10 montrent les seuils moyens mesurés avec et sans protecteur pour l'ensemble des 36 situations testées. Pour mieux visualiser l'effet du port de PICB, les figures 7, 9, 11 présentent, pour chaque

situation, la différence Δ entre le seuil moyen avec PICB et le seuil moyen sans PICB (quand Δ a une valeur négative, le port du PICB a tendance à améliorer la perception ; quand Δ a une valeur positive, le port du PICB a tendance à détériorer la perception). La présence du symbole « * » signifie que la différence est statistiquement significative (test des rangs de Wilcoxon, $p < 0,05$). En l'absence du symbole « * », l'effet du port de PICB est jugé statistiquement non significatif.

5.1. Agents de maintenance

La particularité des tests sur les agents de maintenance est que les effectifs des tests avec les BMI (en moyenne 30 agents) sont environ le double de ceux des tests sans PICB (en moyenne 14 agents). De plus, étant donné que ce ne sont pas les mêmes agents qui ont passé les tests avec et sans protecteur, l'effet observé du protecteur pourrait être dû au fait que les statuts auditifs des agents qui ont passé les tests avec et sans protecteur sont différents. On a donc comparé, pour chaque situation, le statut auditif moyen (i.e. pertes auditives et largeurs de filtres auditifs mesurées selon l'approche proposée par Sabourin [10]) des sujets qui ont passé les tests avec PICB et sans PICB. Les statuts auditifs moyens obtenus étant très similaires, l'effet observé du PICB n'est pas dû aux différences de statut auditif entre les sujets qui ont passé les tests avec PICB et ceux sans PICB.

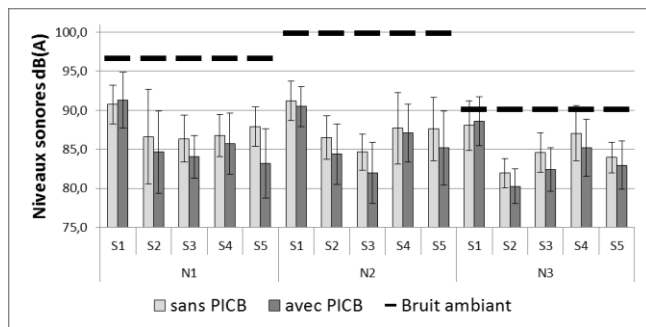


FIGURE 6 : Seuils moyens avec et sans PICB pour les agents de maintenance.

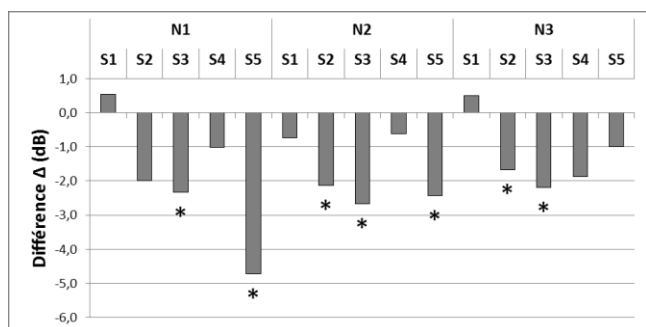


FIGURE 7 : Différences entre les seuils moyens avec et sans PICB pour les agents de maintenance.

Les différences Δ de la Figure 7 étant quasiment toujours négatives, le port du PICB va quasiment toujours dans le sens de l'amélioration de la perception. Sur les 15 situations testées, il y a 7 améliorations statistiquement significatives (test des rangs de Wilcoxon, $p < 0,05$) ; 8 situations où le PICB n'a pas d'effet significatif et jamais de détérioration significative.

Le fait qu'il n'y ait pas de détérioration de la perception s'explique par la combinaison des trois caractéristiques suivantes : (1) l'énergie des bruits ambiants est uniformément répartie en fonction de la fréquence, (2) les signaux d'alarme ont de l'énergie sur l'ensemble du spectre et en particulier pour les fréquences inférieures à 1500 Hz et (3) les affaiblissements des BMI testés sont relativement uniformes en fonction de la fréquence. Ces trois caractéristiques aboutissent à des phénomènes de masquage sous PICB qui sont moins importants que sans PICB (voir section 2).

5.2. Conducteurs

Les tests concernant les conducteurs de trains sont ceux pour lesquels les effectifs sont les plus importants : environ 70 personnes en moyenne ont passé les tests sans PICB et avec les BMI.

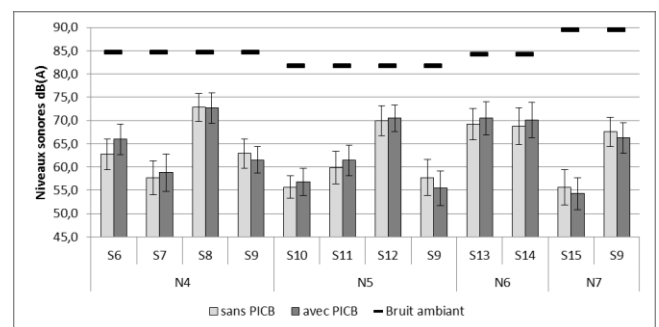


FIGURE 8 : Seuils moyens avec et sans PICB pour les conducteurs.

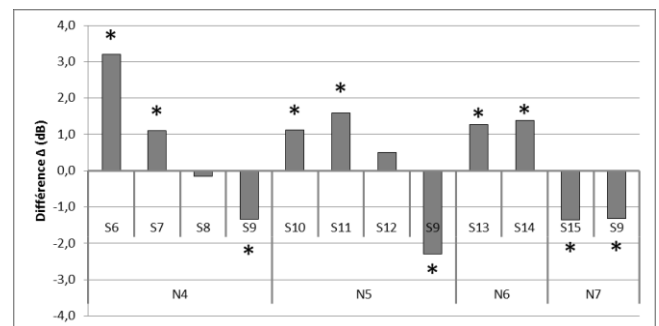


FIGURE 9 : Différences entre les seuils moyens avec et sans PICB pour les conducteurs.

Les Figures 8 et 9 montrent que dans la grande majorité des cas (10 situations parmi les 12 situations testées), les écarts sont inférieurs à ± 2 dB donc l'effet du port de BMI modifie faiblement la perception. Sur les 12 situations testées, les tests de Wilcoxon ($p < 0,05$) aboutissent aux résultats suivants : 4 améliorations, 2 « pas d'effet » et 6 détériorations.

Les 6 détériorations concernent les signaux qui n'ont pas ou peu d'énergie pour les fréquences inférieures à 2000 Hz. Il s'agit d'une part des 4 signaux qui ont exclusivement des composantes supérieures à 2000 Hz : les signaux mono-fréquentiels S6, S10 et S13 (de fréquences respectives 3100, 2880 et 3000 Hz) et le signal S14 (sifflet dont l'énergie prédomine entre 2100 et 4700 Hz). Et d'autre part, des signaux S7 et S11 qui ont à la fois des composantes inférieures et supérieures à 2000 Hz mais dont

les composantes supérieures à 2000 Hz dominant. Ainsi, les 6 signaux qui aboutissent à des détériorations ne sont pas en accord avec la norme ISO 7731 qui recommande, de manière générale, d'utiliser deux composantes dominantes entre 500 Hz et 1500 Hz et qui demande, « dans le cas de personnes portant une protection auditive ou présentant une perte auditive », à ce que « l'énergie du signal dans le domaine de fréquences en deçà de 1 500 Hz soit suffisante ».

D'un autre côté, les 4 améliorations concernent exclusivement les signaux « bi-tons » (alternance de deux tonalités) : le signal S9 (dans 3 bruits ambiants) et le signal S15. Les améliorations pour le signal S9 sont certainement dues au fait qu'il a de l'énergie pour des fréquences suffisamment basses (les fondamentales des deux tons sont de 1800 et 1410 Hz) pour éviter l'élévation des seuils de masquage (voir section 2). L'amélioration pour le signal S15 est inexplicable car, étant donné que les fréquences du signal sont élevées (fondamentales des deux tons à 3195 et 3545 Hz), on s'attendrait plutôt à une détérioration de la perception (comme c'est le cas pour le signal S6, de fondamentale 2880 Hz, dans le bruit N4).

5.3. Agents à quai

Pour les 9 situations testées, entre 19 et 21 personnes ont passé les tests avec et sans PICB. Comme pour les tests sur les conducteurs, les écarts sont limités à ± 2 dB donc l'effet du port de BMI modifie faiblement la perception.

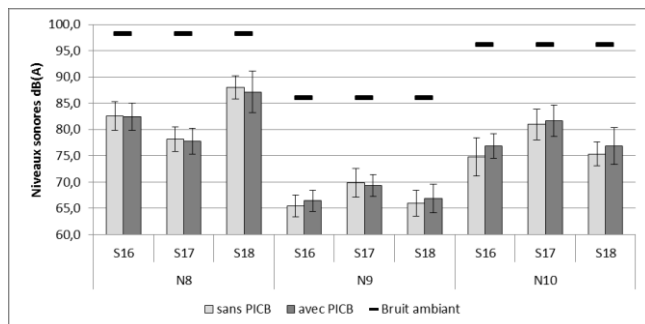


FIGURE 10 : Seuils moyens avec et sans PICB pour les agents à quai.

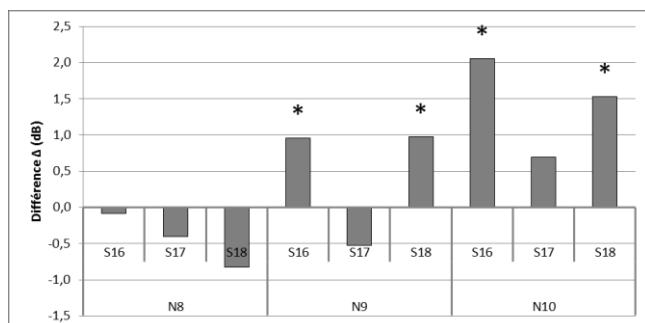


FIGURE 11 : Différences entre les seuils moyens avec et sans PICB pour les agents à quai.

Sur ces 9 situations, les tests de Wilcoxon ($p < 0,05$) aboutissent aux résultats suivants : aucune amélioration, 5 « pas d'effet » et 4 détériorations. A noter qu'il n'y a pas de dégradation pour le bruit N10 (bruit d'échappement d'air) car ce bruit domine dans les hautes fréquences (pas

d'augmentation des phénomènes de masquage sous protecteur). Au contraire, les détériorations observées pour les deux autres bruits sont dues au fait que ces bruits ont beaucoup d'énergie aux tiers d'octave centrés à 250 et 315 Hz et que le masquage créé par ces composantes est plus important avec PICB que sans PICB (voir section 2). Le fait que le PICB n'a pas d'effet sur la perception de l'avertisseur grave alors qu'il détériore la perception des deux autres signaux (avertisseur aigu et sifflet) est dû au fait que l'avertisseur grave a une raie fréquentielle dominante à plus basse fréquence (1456 Hz) que les deux autres signaux (1994 Hz pour avertisseur aigu et supérieure à 2200 Hz pour le sifflet).

6 Discussion / Conclusion

Les mesures de seuils masqués réalisées en laboratoire aboutissent dans la majorité des situations (30 cas sur les 36 cas étudiés) à des écarts sur les seuils moyens avec et sans PICB qui sont limités à ± 2 dB, donc le port de protecteurs modifie faiblement la perception des signaux de danger. Ces écarts apparaissent faibles notamment vis-à-vis des variations de niveaux des bruits ambiants et des alarmes qui sont susceptibles d'être rencontrées en situations réelles.

Pour les agents de maintenance des voies, la perception n'est jamais dégradée de manière significative car les bruits ambiants ont leur énergie répartie de manière uniforme en fonction de la fréquence et les signaux ont des composantes sur l'ensemble du spectre (et en particulier pour des fréquences inférieures à 1500 Hz). Par contre, pour les conducteurs et les agents de quais, la perception est détériorée dans certaines situations. Les détériorations concernent les signaux qui, parce qu'ils n'ont pas (ou pas suffisamment) d'énergie en dessous de 1500 Hz, ne satisfont pas les exigences de la norme ISO 7731. Afin d'améliorer leur audibilité, ces signaux mériteraient d'être modifiés en leur ajoutant des composantes dominantes à plus basses fréquences (inférieures à 1500 Hz).

D'autre part, pour les cas de détérioration, l'audibilité des signaux devrait être évaluée en conditions réelles (par exemple en utilisant la méthode de l'essai d'écoute proposée à l'annexe C de la norme ISO 7731 [6]) dans le but de vérifier que, malgré la dégradation due au PICB, les alarmes sont encore jugées clairement audibles.

Dans cette étude, l'effet du port de PICB sur la perception de signaux d'alarme a été évalué uniquement en comparant les seuils masqués avec et sans PICB. En particulier, l'effet du port de PICB sur la localisation spatiale des alarmes n'a pas été évalué. S'il est difficile de généraliser les résultats parfois contradictoires obtenus dans différentes études, il semble cependant que de manière générale le port de serre-tête (casque anti-bruit) dégrade plus la localisation que le port de bouchons [11, 12]. Ceci s'explique par le fait que les serre-tête couvrent tout le pavillon l'oreille et que celui-ci participe à la localisation (en plus du déphasage et de la différence de niveau entre les deux oreilles).

Un autre aspect qui n'a pas été évalué est l'impact de la protection auditive sur « l'urgence perçue » associée à l'alarme (« perceived urgency » en anglais), qui représente la sensation (subjective) d'urgence lorsque l'alarme est entendue [13]. Cette notion est importante notamment

lorsque, suite à une alarme sonore, un travailleur doit rapidement quitter une zone dangereuse.

Enfin, bien que de nombreuses situations aient été étudiées, ces tests de laboratoire ne peuvent pas prendre en compte toutes les situations réelles de travail des opérateurs. En effet, les bruits masquant peuvent fluctuer dans le temps et les signaux d'alarme peuvent s'atténuer selon la distance entre l'opérateur et le dispositif délivrant ce signal.

Il est donc nécessaire, en complément de ces études en laboratoire, de réaliser des expérimentations en situations réelles de travail pour s'assurer que le port de protecteur auditif ne compromet pas la sécurité des opérateurs dans les multiples situations sonores qu'ils peuvent rencontrer au quotidien dans leurs postes de travail. Ces expérimentations ont déjà débuté dans différents établissements de l'entreprise et, compte tenu du risque ferroviaire, des précautions particulières sont prises pour éviter le risque d'accident lié à la non-perception d'une alarme dans une situation sonore non appréhendée.

D'autre part, la population qui a réalisé les tests auditifs de l'étude étant en majorité normo-entendante, la principale perspective envisagée est de réaliser de nouveaux tests avec des agents dont les pertes sont plus importantes que celles des agents qui ont participé à cette étude. L'enjeu est de savoir jusqu'à quel degré de malentendance le port de protecteurs auditifs peut être autorisé en toute sécurité en milieu ferroviaire.

Références

- [1] WILKINS P.A., MARTIN A.M. - Hearing protection and warning sounds in industry - a review. *Applied Acoustics*, 1987, 21 (4), pp. 267-293.
- [2] GIGUÈRE C., BERGER E.H. - Modeling the interaction between the hearing protector attenuation function and the hearing loss profile on sound detection in noise. *Euronoise 2015*, 2015, Maastricht.
- [3] ISO 1999 Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment, 1990.
- [4] ANSI/ASA S3.4 - Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds, 2007 (R 2012).
- [5] NF EN 458 Protecteurs individuels contre le bruit. Recommandations relatives à la sélection, à l'utilisation, aux précautions d'emploi et à l'entretien, 2005.
- [6] NF EN ISO 7731 Signaux de danger pour lieux publics et lieux de travail - Signaux de danger auditifs, 2005.
- [7] RABAU G., CHATRON J., GETTLIFFE J.-P. - Mesures de seuils de détection de signaux d'alerte ferroviaires en présence de bruit de fond. CFA2014, 2014, Poitiers.
- [8] WILCOXON F. - Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1945, 1 (6), pp. 80-83.
- [9] NF EN 352-2 Protecteurs individuels contre le bruit - Exigences générales - Partie 2 : bouchons d'oreille, 2003.
- [10] SABOURIN C., CD-based application for the measurement of frequency selectivity. M.H.Sc., research project report, 2003: Audiology and Speech-Language Pathology Program, University of Ottawa.
- [11] ABEL S.M., HAY V.H. - Sound Localization the Interaction of Aging, Hearing Loss and Hearing Protection. *Scand. Audiol.*, 1996, 25 (1), pp. 3-12.
- [12] ALALI K.A., CASALI J.G. - The challenge of localizing vehicle backup alarms: Effects of passive and electronic hearing protectors, ambient noise level, and backup alarm spectral content. 99-112, 2011, 13 (51).
- [13] VAILLANCOURT V., NÉLISSE H., LAROCHE C., GIGUÈRE C., BOUTIN J., LAFERRIÈRE P. - Comparison of sound propagation and perception of three types of backup alarms with regards to worker safety. *Noise & Health*, 2013, 15 (67), pp. 420-436.