

## Notes techniques

# COMMENT ÉTUDIER L'EFFET D'UN PROTECTEUR AUDITIF SUR L'AUDIBILITÉ DES SIGNAUX AVERTISSEURS DE DANGER?

**Le port de protecteurs auditifs (bouchons d'oreilles, casques anti-bruit) est susceptible de nuire à la perception des signaux sonores indicateurs de danger, comme l'alarme de recul d'un chariot élévateur. Dans le cadre d'un partenariat entre l'INRS et la SNCF, l'effet du port de protecteurs a été évalué à partir de signaux sonores caractéristiques des trois principaux métiers du secteur ferroviaire.**

JEAN-PIERRE  
ARZ  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

**E**n milieu industriel, la perception de signaux sonores indiquant un danger est impérative pour protéger les travailleurs face au risque d'accident. Cette problématique est présente dans de nombreux secteurs d'activité, notamment les transports (route et ferroviaire), la logistique, le BTP et la collecte des déchets. Elle se pose particulièrement dans les environnements bruyants qui nécessitent le port de protecteurs individuels contre le bruit (PICB) (Cf. Encadré 1). Ceux-ci peuvent 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 des travailleurs en assurant l'audibilité des signaux de danger. Partant de ce principe, la SNCF et l'INRS se sont associés pour évaluer l'effet du port de protecteurs chez les agents de l'entreprise ferroviaire. Celle-ci constitue en effet un cas particulier, car pour garantir la sécurité de son personnel vis-à-vis du risque ferroviaire (risque de heurt par un train), le port de PICB a toujours été interdit à proximité des voies ferrées. Cette interdiction a été rendue possible, d'une part, par une dérogation réglementaire (article L. 4111-4 du Code du travail) lui permettant de ne pas contraindre ses agents à porter de PICB et, d'autre part, par un règlement interne à la SNCF interdisant le port de PICB à proximité des voies ferrées. Mais depuis mai 2009, la dérogation n'étant plus accordée (évolution de l'article L. 4111-4), la SNCF a voulu évaluer l'effet du port de PICB pour ses 45 000 agents soumis conjointement au risque ferroviaire et au risque lié à l'exposition au bruit. Cet effectif regroupe les trois principaux métiers du secteur ferroviaire: les agents chargés de la

maintenance des voies ferrées (20 000 agents), les conducteurs de train (17 000 agents) et les agents travaillant en gare à proximité des voies de chemin de fer dits « agents de quais » (8 000 agents).

### Des effets difficiles à évaluer

Comment étudier l'influence du port d'un PICB sur la perception d'un signal de danger? De manière générale, l'effet sur la perception de signaux acoustiques est difficile à évaluer. Il dépend de nombreux paramètres parmi lesquels les niveaux et les spectres respectifs du signal et du bruit ambiant, l'audition des individus (ces derniers ont-ils une audition normale ou non?) et les valeurs d'atténuation du PICB, c'est-à-dire les diminutions des niveaux sonores, en dB, apportées par le PICB. Or, tous ces paramètres varient avec la fréquence.

La solution consiste à comparer les seuils masqués avec et sans PICB. Le seuil masqué d'un signal de

#### ENCADRÉ 1

#### QUAND DOIT-ON PORTER DES PROTECTEURS AUDITIFS?

La réglementation (articles R 4431-2 et R 4434-7 du Code du travail) exige que:

- lorsque les valeurs d'exposition inférieures sont dépassées (Lex,8h=80 dB(A) ou LpC=135 dB(C)), des PICB doivent être mis à disposition des salariés;
- lorsque les valeurs d'exposition supérieures sont dépassées (Lex,8h=85 dB(A) ou LpC=137 dB(C)), l'employeur doit veiller au port effectif des PICB.

danger est, dans un bruit ambiant donné, le niveau sonore minimal pour qu'il soit entendu malgré ce bruit. 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.

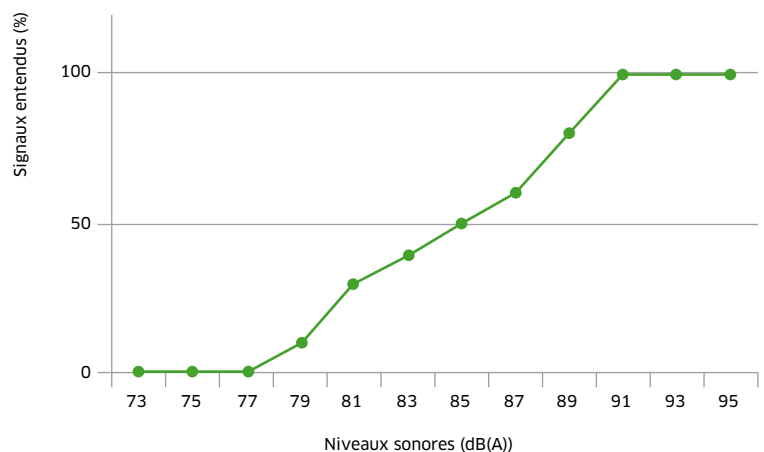
Les différentes études consacrées à l'influence du port de PICB ont montré qu'il existe trois phénomènes distincts à l'origine de l'influence du PICB: deux permettent d'expliquer la dégradation et un permet d'expliquer l'amélioration de la perception des signaux de danger.

Tout d'abord, la perception peut être dégradée parce que les atténuations provoquées par le PICB s'ajoutent aux pertes auditives de l'individu et augmentent les seuils d'audition. Pour des travailleurs qui n'ont pas (ou peu) de pertes auditives, cette dégradation est limitée à des niveaux sonores relativement faibles (tels que ceux de la parole) pour lesquels le port de protecteur auditif n'est pas nécessaire. En revanche, dans le cas de 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 les pertes auditives sont les plus élevées [1] et où les atténuations des PICB sont généralement les plus importantes.

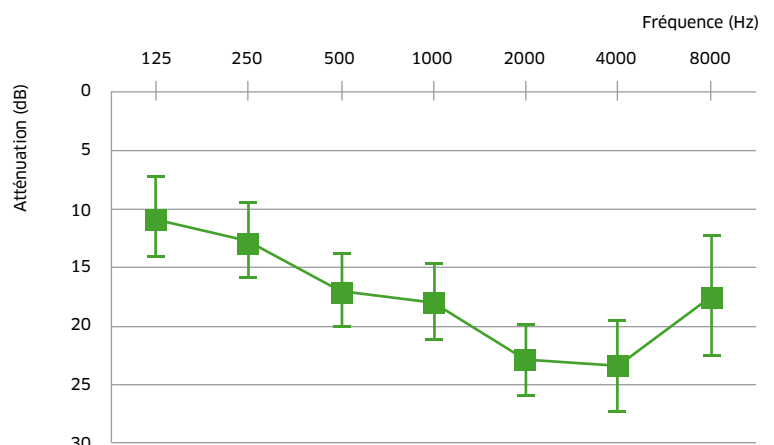
Le deuxième phénomène qui explique pourquoi le port d'un PICB peut dégrader la perception est plus complexe, car lié à la modification des phénomènes de masquage fréquentiel lorsqu'un PICB est porté. Le masquage fréquentiel représente la capacité d'un son à rendre inaudibles (c'est-à-dire à « masquer ») des sons de fréquences différentes. Les deux principales caractéristiques du masquage fréquentiel sont qu'un son d'une fréquence donnée masque davantage les fréquences supérieures que les fréquences inférieures et que, lorsque le niveau du son masquant augmente, le masquage s'étend sur une plus grande largeur en fréquence.

La première caractéristique du masquage fréquentiel explique pourquoi la perception d'un signal de danger peut être dégradée, en particulier dans le cas d'un bruit ambiant qui domine dans les basses fréquences et d'un protecteur qui atténue davantage les hautes fréquences. 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. La conjonction de ces deux phénomènes rend le signal inaudible sous le protecteur. Pour éviter cette dégradation, plusieurs normes [2, 3] conseillent des PICB à atténuation uniforme en fonction de la fréquence.

Le fait que le masquage s'étende à de plus en plus de fréquences lorsque le niveau du son masquant



↑ FIGURE 1 Exemple de fonction psychométrique mesurée pour un volontaire: pourcentage de signaux entendus en fonction du niveau du signal en dB(A). Seuil masqué à 50%: 85 dB(A). Seuil masqué à 100%: 91 dB(A).



↑ FIGURE 2 Atténuations des bouchons moulés individuels testés. Moyennes et écarts-types déclarés par le fabricant selon la norme ISO 4869-1 [7].

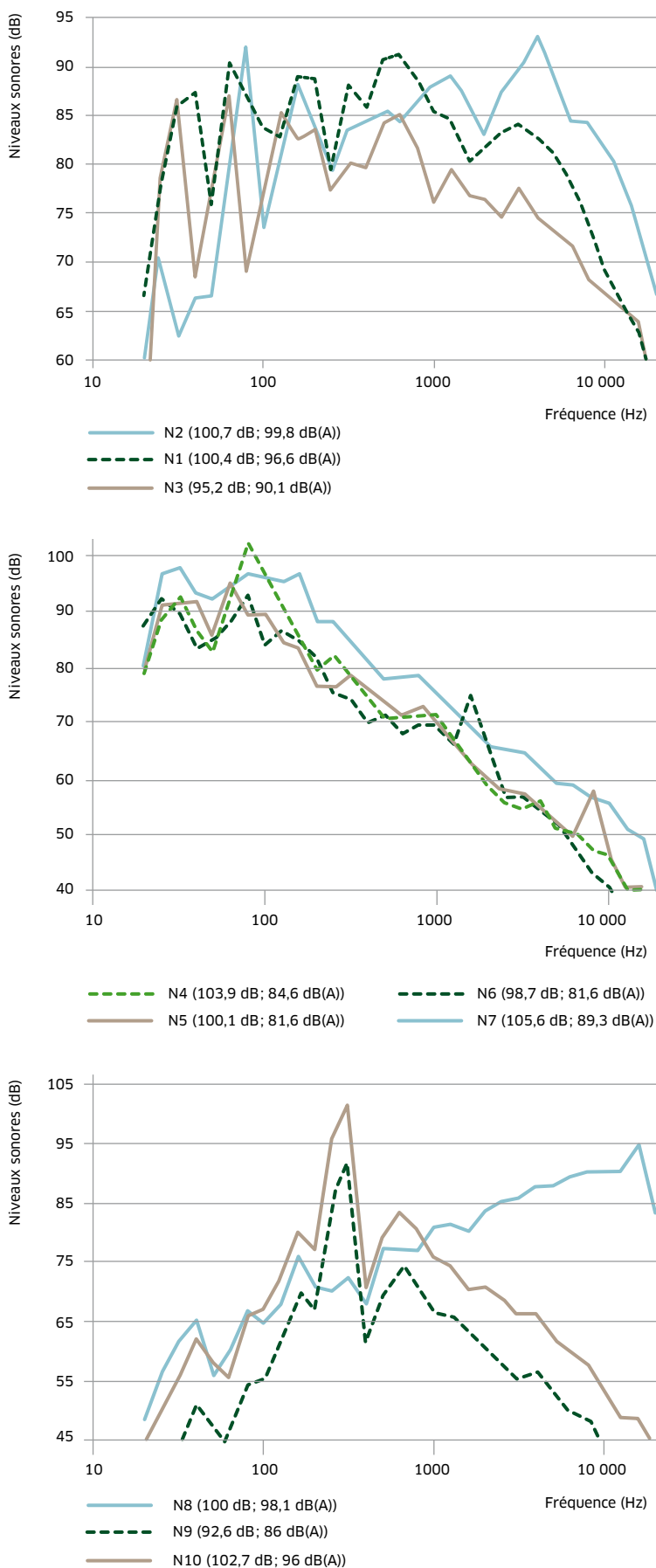
augmente peut également expliquer pourquoi le port d'un PICB améliore la perception des signaux. En effet, la réduction de niveau sonore apportée par le PICB permet de faire travailler l'oreille à des niveaux sonores pour lesquels les phénomènes de masquage sont moins importants. On s'attend en particulier à des améliorations lorsque les affaiblissements du PICB sont uniformes et/ou en présence de bruits qui ne dominent pas en basses fréquences.

## Évaluation de l'influence du port d'un PICB

L'influence du port d'un PICB est donc évaluée en comparant les seuils masqués avec et sans PICB. Cette évaluation peut être réalisée à l'aide de deux méthodes différentes: la mesure des seuils masqués sur un panel de volontaires grâce à des tests auditifs et le calcul des seuils masqués grâce à un modèle psychoacoustique. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients.

L'inconvénient majeur des mesures sur volontaires est qu'elles sont relativement lourdes à mettre en œuvre. Par opposition, l'utilisation d'un modèle permet d'étudier facilement des situations variées. Le modèle Detectsound [4] permet d'étudier, à la





↑ FIGURE 3 Spectres en tiers d'octave des bruits ambiants pour les 3 métiers (moyennes sur 1 seconde). En haut : agents de maintenance; au milieu : conducteurs; en bas : agents de quai.

fois séparément et de manière combinée, l'influence des différents paramètres (atteintes auditives, atténuations du PICB) sur la perception des signaux. En revanche, l'inconvénient majeur des modèles est qu'ils nécessitent des paramètres d'entrée précis, en particulier les valeurs d'atténuation du PICB en fonction de la fréquence. Or, il est avéré que les atténuations des protecteurs en conditions réelles de travail sont largement inférieures aux données déclarées par les constructeurs [5].

Dans le cadre de l'étude présentée dans cet article, il n'était pas envisageable de mesurer les atténuations réelles des protecteurs. C'est pourquoi l'influence du port de PICB a été évaluée par la mesure des seuils masqués sur un panel de volontaires grâce à des tests auditifs.

Les seuils masqués ont été mesurés par la méthode des stimuli constants, développée et mise en œuvre par le CNRS-LMA [6]. Le niveau du bruit ambiant est fixe (et égal à son niveau en conditions réelles) et le niveau du signal varie de manière aléatoire à chaque test. Après chaque présentation d'un son, la personne répond simplement si « oui » ou « non » elle a entendu le signal. Au total, le signal est présenté à douze niveaux différents et chaque niveau est répété dix fois (12 × 10 = 120 présentations).

La durée des séquences sonores étant d'une seconde, la mesure est relativement rapide (environ 3 minutes). On obtient ainsi la fonction psychométrique, c'est-à-dire l'évolution du pourcentage de fois où le signal a été entendu en fonction du niveau du signal. Un exemple est donné à la figure 1.

Au total, 143 agents volontaires de la SNCF (121 hommes et 22 femmes), âgés de 22 à 60 ans (moyenne = 39,9 ans; écart-type = 9,4 ans) ont participé aux tests auditifs. Ils ont été sélectionnés, car ils avaient peu de pertes auditives: pour plus de 80% des agents, les pertes de 125 à 4000 Hz sont inférieures à 25 dB HL. Les tests ont eu lieu dans un local traité en absorption (temps de réverbération = 0,15 s). Les PICB testés sont des bouchons moulés individuels (BMI) en silicone équipés de filtres plats. Ils ont été choisis en raison de leurs atténuations relativement uniformes en fonction de la fréquence (Cf. Figure 2). Au total, 36 situations sonores (une situation sonore = un bruit ambiant + un signal d'alarme) ont été testées pour l'ensemble des trois métiers. Les niveaux sonores des bruits ambiants sont compris entre 82 et 100 dB(A). À partir de ces mesures, l'INRS s'est chargé de l'analyse des données et de l'interprétation des résultats dans le but de caractériser l'effet du port de PICB (Cf. Figure 3). Pour les agents de maintenance (15 situations = 3 bruits × 5 alarmes), les trois bruits ambiants testés (N1 à N3) étaient répartis de manière relativement uniforme sur l'ensemble du spectre. Les bruits N1 et N2 correspondent à des opérations de bourrage du ballast (N1 à du « bourrage mécanique » et N2 à

du « bourrage manuel ». Le troisième bruit ambiant correspond au bruit d'une tirefonneuse (machine servant à visser ou dévisser les tirefonds dans les traverses). Les cinq signaux d'alarme étaient tous des sons multifréquentiels composés d'une fondamentale (située entre 350 et 660 Hz) et de nombreux harmoniques.

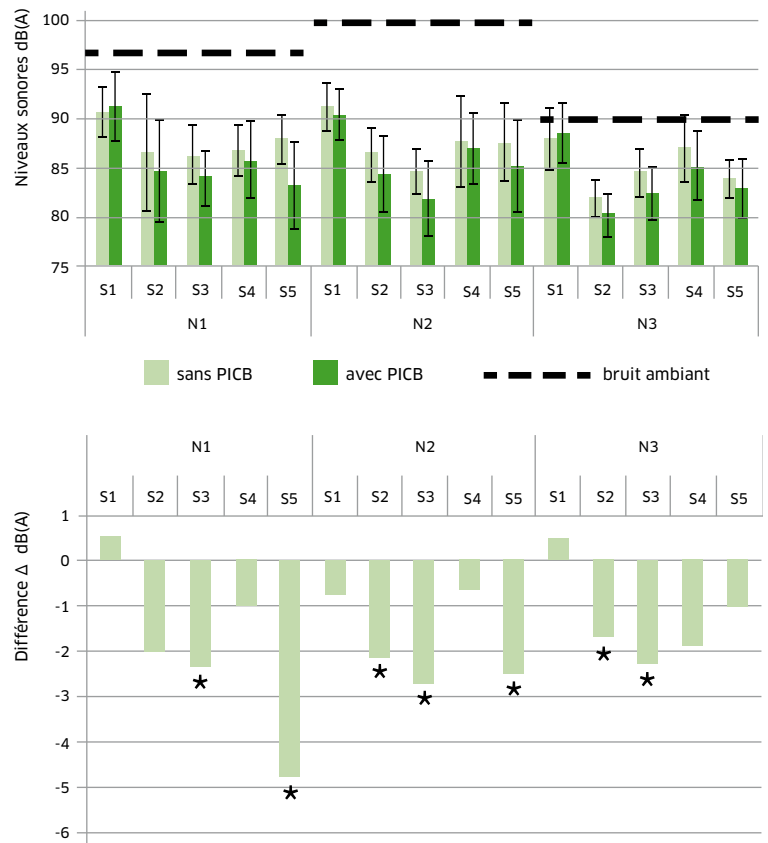
Pour les conducteurs, douze situations ont été testées. Elles mettent en jeu quatre bruits ambiants et dix signaux de danger propres à chaque engin moteur. Les quatre bruits ambiants (N4 à N7) étaient les bruits en cabine de conduite et à vitesse maximale de quatre engins moteurs différents. Ils dominent largement en basses fréquences. Les dix signaux d'alarme testés étaient des signaux de conduite qui avertissent le conducteur d'un événement nécessitant généralement une action de sa part. Ils sont de plusieurs types, à la fois temporels (sons constants, pulsés, alternance de deux tons) et fréquentiels (sons monofréquentiels, multifréquentiels harmoniques et non harmoniques).

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. Les deux autres bruits (N9 et N10) représentent des bruits d'ambiance à proximité d'un TGV à quai, dominant largement aux tiers d'octave centrés à 250 et 315 Hz (composante à 300 Hz d'un bruit de ventilateur de TGV). Les trois signaux d'alarme étaient des signaux qui avertissent les agents que des manœuvres vont avoir lieu: deux sons multifréquentiels harmoniques (un avertisseur aigu (S16) de fondamentale 648 Hz et un avertisseur grave (S17) de fondamentale 364 Hz) et un son de sifflet (son non harmonique (S18), dont l'énergie s'étend de 2 200 à 2 900 Hz).

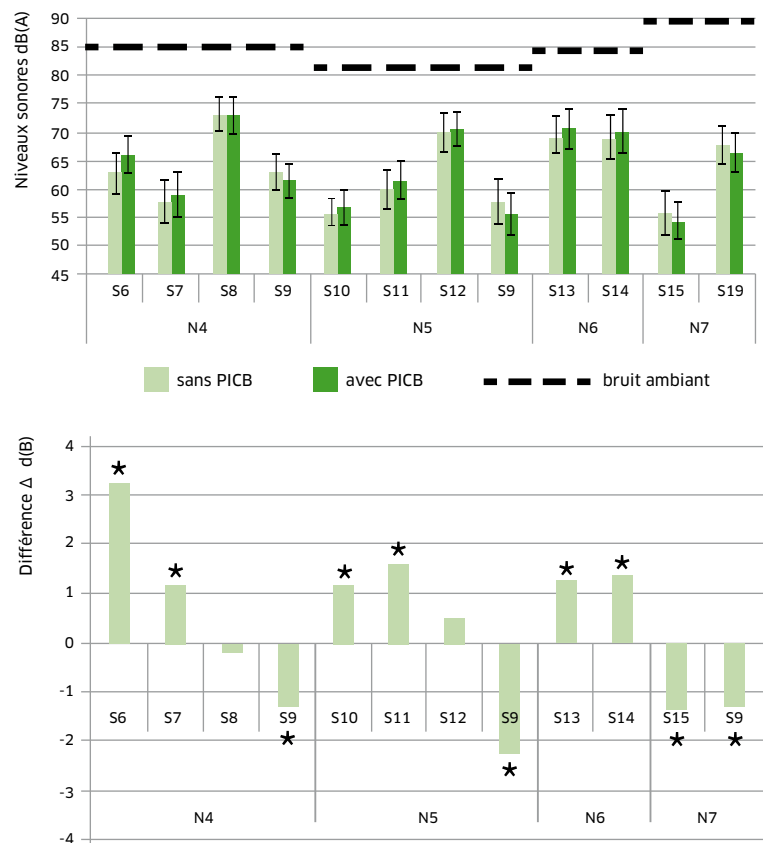
## Résultats des mesures de seuils

Les résultats des analyses développées et mises en œuvre par l'INRS sont présentés dans les figures 4, 5 et 6 pour les trois métiers considérés. Les graphiques du haut présentent les seuils moyens mesurés avec et sans PICB sur le panel de volontaires, pour les 36 situations testées. Pour mieux visualiser l'effet du port de PICB, la différence  $\Delta$  entre le seuil moyen avec PICB et le seuil moyen sans PICB est également présentée sur le graphique du bas des figures 4 à 6. Quand  $\Delta$  a une valeur négative, le port du PICB a tendance à améliorer la perception. Et quand  $\Delta$  a une valeur positive, le port du PICB a tendance à détériorer la perception.

Compte tenu des écarts-types associés aux seuils moyens, des analyses statistiques complémentaires ont été réalisées (test des rangs de Wilcoxon) pour évaluer si l'effet du PICB est significatif. Dans les figures 4 à 6, la présence du symbole « \* » signifie que la différence est statistiquement significative ( $p < 0,05$ ).

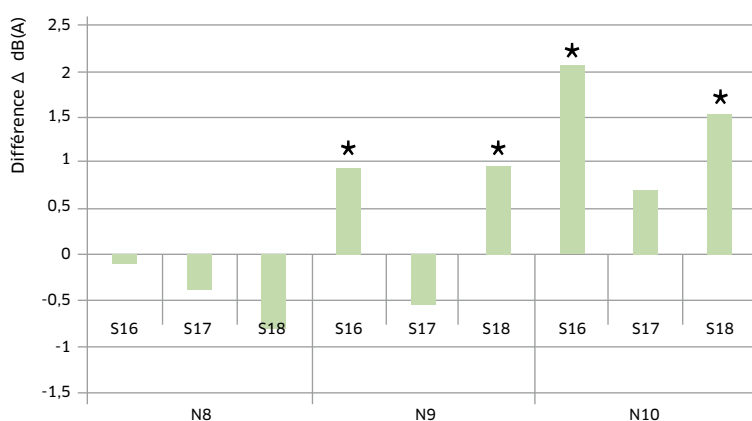
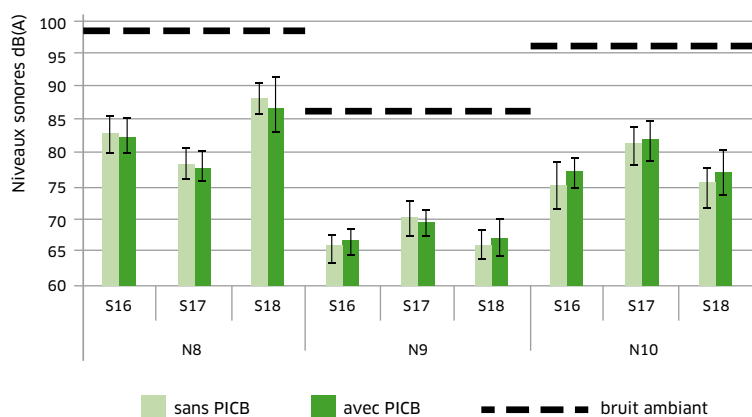


↑ FIGURE 4 Résultats pour les agents de maintenance. En haut: seuils moyens avec et sans PICB. En bas: différences entre seuils moyens avec et sans PICB.



↑ FIGURE 5 Résultats pour les conducteurs. En haut: seuils moyens avec et sans PICB. En bas: différences entre seuils moyens avec et sans PICB.





↑ FIGURE 6 Résultats pour les agents de quais. En haut : seuils moyens avec et sans PICB. En bas : différences entre seuils moyens avec et sans PICB.

En raison de contraintes matérielles, les agents de maintenance qui ont passé les tests avec les bouchons moulés individualisés (BMI) étaient différents de ceux qui les ont passés sans. De plus, les effectifs des tests avec les BMI (en moyenne 30 agents) étaient différents de ceux ayant passé des tests sans BMI (en moyenne 14 agents). On a alors comparé les pertes auditives moyennes des deux groupes de volontaires. Les pertes auditives moyennes obtenues étant très similaires, l'effet observé du PICB n'est pas dû aux différences de pertes auditives entre les deux groupes qui ont passé les tests. Les différences  $\Delta$  de la figure 4 étant quasiment toujours négatives, le port du PICB va presque toujours dans le sens de l'amélioration de la perception. Sur les quinze situations testées, il y a sept améliorations statistiquement significatives (dont six supérieures à 2 dB) et huit situations où le PICB n'a pas d'effet significatif.

Le fait que la perception soit améliorée par le port de PICB s'explique par la combinaison des trois caractéristiques suivantes :

- l'énergie des bruits ambiants est uniformément répartie en fonction de la fréquence (Cf. Figure 3) ;
- les signaux d'alarme ont de l'énergie sur l'ensemble du spectre ;
- les affaiblissements des BMI testés sont relativement uniformes en fonction de la fréquence.

Les phénomènes de masquage avec PICB sont ainsi moins importants que sans PICB.

Les tests concernant les conducteurs de trains ont été réalisés sur les effectifs les plus importants : environ 70 personnes en moyenne, sans et avec les BMI. Pour dix des douze situations testées (Cf. Figure 5), les écarts sont inférieurs à  $\pm 2$  dB. Le port des BMI modifie donc faiblement la perception. L'analyse statistique aboutit à quatre améliorations, six détériorations et deux sans effet.

Les six détériorations concernent les signaux qui n'ont pas ou peu d'énergie pour les fréquences inférieures à 2 000 Hz. Ces signaux ne sont pas en accord avec la norme NF EN ISO 7731, définissant des critères de conception des signaux de danger auditifs, qui recommande d'utiliser deux composantes dominantes entre 500 Hz et 1 500 Hz.

Les quatre améliorations concernent exclusivement les signaux « bi-tons » : le signal S9 dans trois bruits ambiants (N4, N5 et N7) et le signal S15 dans N7. Les améliorations pour le signal S9 sont certainement dues au fait que celui-ci a de l'énergie sur des fréquences suffisamment basses pour éviter le masquage (les fondamentales des deux tons sont de 1 410 et 1 800 Hz). L'amélioration pour le signal S15 est inexplicable car, étant donné que les fréquences du signal sont élevées (fondamentales des deux tons à 3 195 et 3 545 Hz), on s'attendrait plutôt à une détérioration de la perception.

Entre 19 et 21 agents de quais ont passé les tests sans et avec les BMI. Comme pour les tests sur les conducteurs, les écarts sont limités à  $\pm 2$  dB, donc l'effet du port des BMI modifie faiblement la perception. Sur les neuf situations testées, l'analyse statistique n'aboutit à aucune amélioration : cinq sans effet et quatre détériorations (Cf. Figure 6).

Il est à noter qu'il n'y a pas de dégradation lorsque le bruit de fond est de type échappement d'air (bruit N8), car il est dominé par les hautes fréquences. Les dégradations sont observées pour les deux bruits de gare (N9 et N10). Elles sont dues au fait que ces bruits ont beaucoup d'énergie aux basses fréquences (tiers d'octave centrés à 250 et 315 Hz) et que le masquage créé est donc plus important avec que sans PICB. En considérant les trois signaux testés, le PICB n'a pas d'effet sur la perception de l'avertisseur grave (S17) alors qu'il détériore la perception des deux autres signaux (avertisseur aigu et sifflet). Cela s'explique par le fait que l'avertisseur grave dispose d'une fréquence dominante plus basse (1 456 Hz) que celle des deux autres signaux (1 994 Hz pour avertisseur aigu et supérieure à 2 200 Hz pour le sifflet).

### Conclusion

Dans cette étude, l'influence du port de PICB sur la perception des signaux sonores avertisseurs de danger a été évaluée en mesurant les seuils masqués

d'alarmes avec et sans PICB. La méthode de mesure est suffisamment rapide (environ 3 minutes par signal) pour pouvoir traiter de nombreuses situations. Dans la majorité des situations (30 sur les 36 cas étudiés), les écarts sur les seuils moyens avec et sans PICB sont limités à  $\pm 2$  dB. Le port de protecteurs modifie donc 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 rencontrées en situations réelles. En effet, les bruits masquant peuvent fluctuer dans le temps et les niveaux des signaux d'alarme peuvent varier selon la distance entre l'opérateur et le dispositif délivrant ce signal.

Cet effet modéré sur la perception est dû, d'une part, au fait que la population testée était majoritairement normo-entendante et, d'autre part, aux atténuations relativement uniformes en fonction de la fréquence des BMI testés. De manière générale, il faut privilégier ce type d'atténuation « plate » pour ne pas compromettre l'audibilité des signaux de danger ou l'intelligibilité de la parole.

Cependant, les résultats montrent que l'effet des BMI dépend des caractéristiques fréquentielles à la fois des bruits ambiants et des signaux. Pour les agents de maintenance des voies, la perception n'est jamais dégradée, car l'énergie des bruits ambiants est répartie de manière uniforme en fonction de la fréquence et les signaux ont des composantes sur l'ensemble du spectre. En revanche, pour les conducteurs et les agents de quais, la perception dans les bruits qui dominent en basses fréquences est détériorée pour les signaux qui n'ont pas (ou pas suffisamment) d'énergie en dessous de 1500 Hz. Ces signaux, qui ne satisfont pas aux exigences de la norme ISO 7731, mériteraient d'être modifiés en leur ajoutant des composantes dominantes à plus basses fréquences afin d'éviter que leur audibilité soit dégradée avec le port d'un PICB.

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. L'autre aspect qui n'a pas été testé est la notion « d'urgence perçue » associée à l'alarme qui représente la sensation (subjective) d'urgence lorsqu'elle est entendue. Cette notion est importante, notamment lorsque retentit une alarme sonore dans le but d'indiquer aux travailleurs qu'ils doivent rapidement quitter une zone dangereuse. Dans une récente étude sur les alarmes de recul [8], les résultats montrent que, bien que l'audibilité soit améliorée avec PICB, l'urgence perçue par les personnes est ressentie comme moins importante lorsque le PICB est porté.

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. 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. En outre, la population testée était 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. ●

1. Les seuils moyens présentés sont la moyenne sur le panel de volontaires des seuils individuels mesurés à 50%. L'effet du port de PICB obtenu à partir des seuils à 100% est similaire.

### Remerciements

L'INRS remercie l'Agence d'essai ferroviaire et les services de prévention de la SNCF pour leur implication dans ce projet.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] ISO 1999. *Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment*, 1990.

[2] 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.

[3] NF EN ISO 7731. *Signaux de danger pour lieux publics et lieux de travail - Signaux de danger auditifs*, 2008.

[4] ZHENG Y., GIGUÈRE C., LAROCHE C., SABOURIN C., GAGNÉ A., ELYEA M., A Psychoacoustical Model for Specifying the Level and Spectrum of Acoustic

Warning Signals in the Workplace, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2007, 4 (2), pp. 87-98.

[5] KUSY A., Affaiblissement acoustique *in situ* des protecteurs individuels contre le bruit - Étude bibliographique, INRS, *Hygiène et sécurité du travail*, ND 2295, 2008, 212, pp. 43-59.

[6] RABAU G., CHATRON J., GETTLIFFE J.-P., Mesures de seuils de détection de signaux d'alerte ferroviaires en présence de bruit de fond. CFA 2014, 2014, Poitiers.

[7] ISO 4869-1 Acoustique. *Protecteurs individuels contre le bruit - Partie 1: Méthode*

subjective de mesurage de l'affaiblissement acoustique, 1990.

[8] 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.