



## **Méthodes d'évaluation de la perception des signaux de danger : influence des atteintes auditives et du port de protecteur auditif**

J.-P. Arz<sup>a</sup>, J.-P. Gettliffe<sup>b</sup> et N. Grimault<sup>c</sup>

<sup>a</sup>INRS, 1 rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandoeuvre, France

<sup>b</sup>Agence d'Essai Ferroviaire, 21, avenue du Président Allende, 94407 Vitry Sur Seine, France

<sup>c</sup>UMR5292 - cnrs - univ Lyon 1, 50 av T Garnier, 69366 Lyon Cedex 07, France

jean-pierre.arz@inrs.fr

En milieu industriel bruyant, la perception de signaux acoustiques indiquant un danger est impérative pour assurer la sécurité des travailleurs devant le risque accident. Dans la pratique, la perception d'un signal de danger ne dépend pas que des niveaux et spectres respectifs du signal et du bruit ambiant. Elle dépend également d'autres paramètres dont le statut auditif des salariés (perte en audibilité et perte de sélectivité fréquentielle) et, dans le cas du port d'un protecteur auditif, de ses affaiblissements en fonction de la fréquence. Pour déterminer, dans un bruit ambiant donné, quel est le niveau nécessaire d'un signal de danger pour qu'il soit entendu, on utilise deux approches complémentaires. La première approche, subjective, consiste à mesurer les seuils de détection du signal sur un panel de sujets grâce à des tests auditifs. La seconde approche, objective, est de calculer les seuils masqués grâce à un modèle psychoacoustique. L'intérêt de cette approche est qu'elle permet d'étudier à la fois séparément et de manière combinée l'influence des différents paramètres sur la perception des signaux. Dans le cadre d'une collaboration avec la SNCF, les résultats donnés par ces deux approches ont été comparés pour trois signaux sonores ferroviaires et deux protecteurs auditifs.

## 1 Introduction

En milieu industriel bruyant, la perception de signaux acoustiques indiquant un danger (par exemple une alarme de recul d'un engin de chantier) est impérative pour assurer la sécurité des travailleurs devant le risque 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 quand le niveau d'exposition est proche de ou supérieur au seuil réglementaire de 85 dB(A) pour 8 h, ce qui pourrait justifier le port d'un protecteur individuel contre le bruit (PICB) [1] mais risquerait d'accroître le risque d'accident si le port de PICB détériorait la perception des signaux de danger. En effet, parce que les affaiblissements apportés par un PICB modifient les phénomènes de masquage fréquentiel, il se peut que des composantes du signal qui sont audibles sans PICB deviennent inaudibles lorsqu'un PICB est porté [2]. L'enjeu du port de PICB est donc double : garantir la sécurité des travailleurs en assurant l'audibilité des signaux de danger et apporter une protection efficace de l'ouïe.

Dans la pratique, l'effet du port de PICB sur la perception de signaux acoustiques 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 (perte d'audibilité et perte de sélectivité fréquentielle) et les affaiblissements du PICB en fonction de la fréquence. Par exemple, dans une étude sur la perception de signaux de danger ferroviaires, Lazarus [3] a observé que la perception avec des bouchons était inchangée ou légèrement meilleure que sans protecteur lorsque la perte auditive (il considère la moyenne des pertes aux fréquences 0,5 ; 1 et 2 kHz) reste inférieure à 20 dB HL. Par contre, lorsque la perte dépasse 20 dB HL, la perception était dégradée en présence de bouchons et cette dégradation augmentait avec l'augmentation de la perte. Concernant l'amélioration de la perception lorsqu'un PICB est porté, cet effet s'explique par la variation de la sélectivité fréquentielle en fonction du niveau global. En effet, les affaiblissements apportés par le protecteur permettent de faire travailler l'oreille à des niveaux plus modérés pour lesquels la sélectivité fréquentielle est améliorée (les filtres auditifs sont moins larges [4]) ; aboutissant à des phénomènes de masquage moins importants que sans protecteur et, au final, à des seuils de détection plus faibles que ceux sans protecteur [2].

Pour déterminer, dans un bruit ambiant donné, quel est le niveau nécessaire d'un signal pour qu'il soit audible, deux approches sont envisageables.

La première approche, subjective, consiste à mesurer les seuils de détection du signal sur un panel de sujets grâce à des tests auditifs. Ces tests auditifs sont nécessaires en raison des écarts parfois importants entre les affaiblissements réels individuels et les affaiblissements affichés sur la notice du PICB [5, 6], en particulier pour des bouchons moulés individualisés [7].

La seconde approche, objective, est de calculer les seuils masqués. La norme ISO 7731 [8], dédiée à la reconnaissance des signaux de danger auditifs, propose un calcul simple des seuils masqués : elle considère uniquement le masquage des basses vers les hautes fréquences avec une pente de 7,5 dB par octave. Si ce modèle « tient compte de degrés modérés de perte d'acuité auditive », il ne permet cependant pas de prendre en compte de manière explicite le statut auditif des individus et peut, dans certains cas, négliger la dégradation apportée par le port de protecteur [9]. Le modèle psychoacoustique Detectsound [10], développé à l'Université d'Ottawa, est plus complet puisqu'il permet de prendre en compte les pertes auditives et la sélectivité fréquentielle des individus. L'intérêt de ce modèle est de pouvoir étudier à la fois séparément et de manière combinée l'influence des atteintes auditives et des affaiblissements des protecteurs [11] sur la perception des signaux de danger.

Dans le cadre d'une collaboration avec la SNCF, qui a entamé la démarche d'étudier la protection par PICB de l'audition de ses agents qui peuvent être soumis parallèlement au risque ferroviaire, ces deux approches de mesure et de calcul des seuils masqués ont été comparées pour deux PICB, un bruit ambiant et trois signaux de conduite caractéristiques des conducteurs de draineuse chasse-neige.

## 2 Méthodes

### 2.1 Mesure des seuils masqués

Les seuils masqués de différents signaux dans un bruit ambiant de niveau fixe ont été mesurés grâce à la méthode des stimuli constants. Cette méthode permet de mesurer la fonction psychométrique : c'est-à-dire l'évolution du pourcentage de signaux entendus en fonction du niveau du signal. Pour ce faire, chaque signal est présenté à douze niveaux différents (la plage des niveaux de tests est préalablement ajustée de manière à atteindre la valeur de

100% de signaux entendus) et chaque niveau est présenté dix fois. Pour limiter la durée totale des tests, la durée du bruit ambiant est fixée à 1 seconde. La durée du signal de danger utilisé 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 Figure 1 présente un exemple de fonction psychométrique obtenu pour un individu. Afin de comparer ces résultats aux seuils masqués calculés (voir section suivante), les deux valeurs retenues sont :

- Le niveau le plus bas à partir duquel 100% des signaux ont toujours été entendus (appelé seuil à 100% dans la suite)
- 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%.

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%.

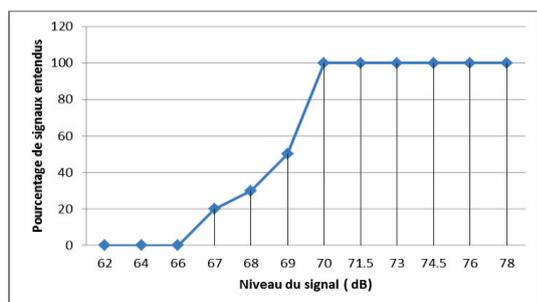


Figure 1 : Exemple de fonction psychométrique mesurée. Seuil à 100% : 70 dB ; seuil à 50% : 69 dB.

Grâce à ces tests auditifs, on obtient donc des données expérimentales qui ont une variabilité intrinsèque à l'utilisation de sujets mais qui présentent l'avantage de prendre en compte l'affaiblissement réel individuel apporté par le protecteur.

## 2.2 Calcul des seuils masqués

Le modèle psychoacoustique Detectsound [10] nécessite les paramètres d'entrée suivants :

- Le spectre en tiers d'octave du bruit ambiant de 25 à 12500 Hz
- Les affaiblissements du PICB pour les octaves de 63 à 8000 Hz
- Le statut auditif de l'individu : pertes auditives pour les 9 fréquences audiométriques allant de 125 à 8000 Hz et paramètres des filtres auditifs centrés à 7 fréquences (125, 250, 500, 1000, 2000, 3000 et 4000 Hz).

A partir de ces paramètres, les seuils masqués pour les tiers d'octave centrés de 125 à 3150 Hz sont calculés selon le modèle proposé par Moore et Glasberg [12]. Finalement, une fenêtre de conception est définie pour évaluer

l'audibilité du signal de danger : sa limite basse dépasse de 12 dB les seuils masqués (de manière à ce que le signal soit clairement audible, par analogie à la norme ISO 7731 [8]) et sa limite haute dépasse de 25 dB les seuils masqués (de manière à ce que le signal ne soit pas trop fort). Pour faciliter la reconnaissance du signal, les auteurs de Detectsound recommandent un minimum de trois composantes situées dans la fenêtre de conception. Le modèle a été validé pour des normoentendants par des comparaisons entre seuils masqués mesurés et calculés, en particulier pour des sons purs en présence de plusieurs types de bruits continus [13].

## 3 Résultats

### 3.1 Situations étudiées et effectifs

Les situations étudiées correspondent à des signaux sonores enregistrés à bord d'une draineuse chasse neige (type DU65). Le bruit ambiant correspond au fonctionnement de la machine à vitesse maximale ; son niveau global est de 87,6 dB(A). Trois signaux acoustiques indicateurs d'un danger ont été testés : GSM FU (ordre de Freinage d'Urgence transmis par téléphone GSM) ; RS (Répétition de Signaux liés à la signalisation) et VACMA (Veille Automatique de Contrôle du Maintien d'Appui). Les signaux RS et GSM FU ont une durée d'environ 0,4 s et le signal VACMA a une durée d'une seconde.

Deux PICB ont été testés :

- Un serre-tête passif : modèle Clarity C1 de marque Howard Leight (appelé « Clarity » dans la suite)
- Des bouchons moulés individuels (BMI) : modèle ClearSound équipé de filtres RC15, de marque Elacin (appelés « BMI » dans la suite)

De plus, les tests auditifs ont également été réalisés sans aucun PICB.

Onze agents SNCF conducteurs de draineuse au total, âgés de 36 à 55 ans (âge moyen 43,3 ans), ont participé aux tests. Les effectifs en fonction du type de protecteur sont les suivants : 11 pour le Clarity ; 10 pour la condition sans protecteur et 9 pour les BMI. Au final, 8 individus ont réalisé la totalité des tests avec et sans protecteur. Les tests se sont déroulés à l'Agence d'Essai Ferroviaire (Vitry-sur-Seine) dans un local traité acoustiquement en absorption.

### 3.2 Mesures des seuils masqués

La Figure 2 présente, pour les 9 configurations testées, les moyennes et écarts-types des seuils à 50% et 100% pour les 8 individus qui ont passé tous les tests. Pour deux individus, le seuil à 50% n'a pas été atteint dans certaines configurations car ils ont toujours entendu plus de 50% des signaux (cela concerne 4 configurations pour un individu et 2 configurations pour l'autre individu). Pour conserver ces deux individus et présenter des résultats sur l'effectif initial de 8 individus, le seuil à 50% a été estimé dans ces 6 cas particuliers en considérant qu'il était égal au plus faible niveau testé diminué de 2 dB. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats observés sur les autres individus.

Le Tableau 1 présente les écarts entre les seuils moyens avec protecteurs et les seuils moyens sans protecteur. Les écarts sont faibles : ils varient entre -1 et +0,4 dB pour les seuils à 50% et entre -1,2 dB et +0,9 dB pour les seuils à

100%. Par contre, les écarts-types (dénommés « Std » dans le Tableau 1) associés à ces écarts moyens sont relativement importants, en particulier pour le signal GSM FU où ils atteignent 5,4 dB. D'autre part, pour un signal et un protecteur donnés, l'effet du protecteur (augmentation ou diminution des seuils par rapport à sans protecteur) n'est pas forcément le même suivant que l'on considère le seuil à 50% ou à 100%. Finalement, étant donnés les effectifs faibles (8 individus), les faibles écarts entre les seuils avec protecteurs et sans protecteur et les variations importantes d'un individu à l'autre, on ne peut pas conclure pour les 3 signaux étudiés sur l'amélioration ou la dégradation apportée en moyenne par le port d'un des deux protecteurs étudiés. En revanche, les résultats montrent que le port de l'un ou l'autre de ces deux protecteurs modifie en moyenne très peu les seuils par rapport aux cas sans protecteur.

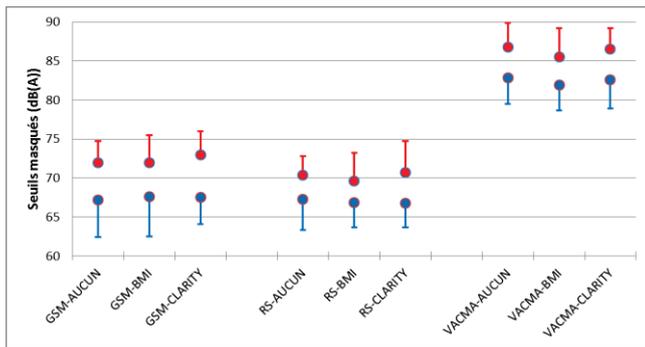


Figure 2 : Moyennes et écarts-types des seuils à 50% et 100% mesurés dans les 9 configurations. Signaux : GSM FU, RS et VACMA. Protecteurs : Aucun, BMI et CLARITY

Tableau 1 : Ecarts moyens des seuils avec protecteurs par rapport à Aucun PICB

Signal	PICB	Ecarts par rapport à Aucun PICB (dB)			
		Seuils à 50%		Seuils à 100%	
		Moyenne	Std	Moyenne	Std
GSM	BMI	0.4	4.6	0.0	3.2
	Clarity	0.3	5.4	0.9	3.8
RS	BMI	-0.4	2.6	-0.8	1.9
	Clarity	-0.5	2.5	0.3	2.4
VACMA	BMI	-1.0	1.3	-1.2	1.3
	Clarity	-0.3	1.8	-0.2	2.0

### 3.3 Calculs des seuils masqués avec Detectsound

Nous commençons par présenter les paramètres d'entrée utilisés pour les calculs de seuils masqués avec Detectsound [10].

Pour les PICB, on a choisi de considérer comme valeurs d'affaiblissements les moyennes affichées sur les notices des fabricants, établies selon la norme ISO 4869-1 [14]. Ces valeurs sont présentées sur la Figure 3. A noter que pour estimer les niveaux sonores sous un PICB selon l'ISO 4869-2 [15], on considère comme valeurs d'affaiblissement l'APV (moyenne moins un écart-type). Cependant, du fait que nous nous intéressons dans cette étude aux dégradations potentielles induites par le port de PICB, nous avons préféré choisir la moyenne (plutôt que l'APV) car ce choix est plus pénalisant [11].

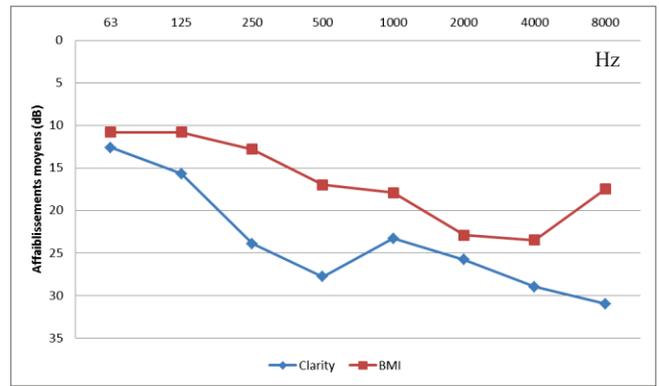


Figure 3 : valeurs d'affaiblissement des PICB (moyennes selon l'ISO 4869-1) selon la fréquence

Concernant le statut auditif, les pertes auditives ont été mesurées par audiométrie tonale liminaire pour les 9 fréquences audiométriques allant de 125 à 8000 Hz. Les Figures 4 et 5 présentent les pertes moyennes et écarts-types pour l'oreille droite et gauche, respectivement. Pour les fréquences qui correspondent à la plage de conception de Detectsound (de 125 à 3000 Hz), les pertes sont en moyenne inférieures à 25 dB HL. Par conséquent les individus peuvent être considérés en moyenne comme normoentendants sur cette plage de fréquences.

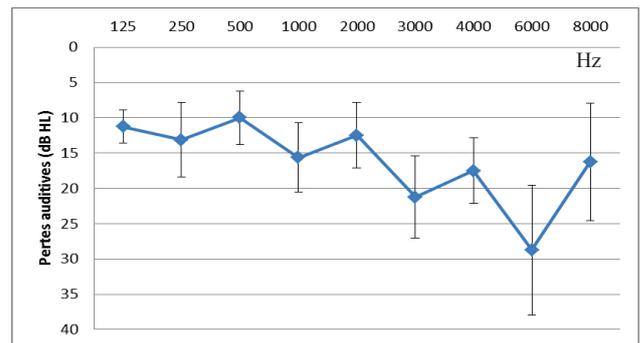


Figure 4 : Pertes auditives moyennes et écarts-types pour l'oreille droite

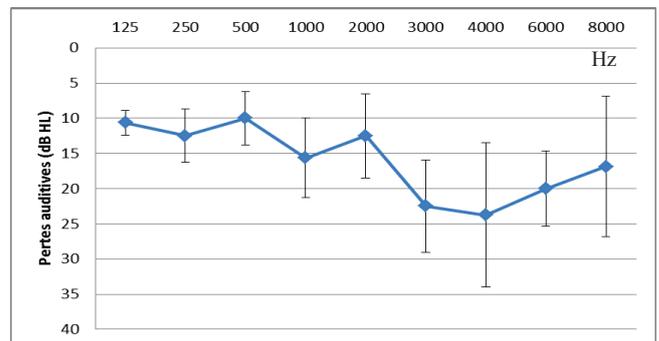


Figure 5 : Pertes auditives moyennes et écarts-types pour l'oreille gauche

La sélectivité fréquentielle est décrite dans Detectsound à l'aide de deux types de paramètres : les facteurs d'efficacité de détection  $K$  en dB et les largeurs rectangulaires équivalentes  $ERB$  en Hz (voir [10]) pour 7 fréquences centrales de filtres de 125 à 4000 Hz. Dans cette étude, les paramètres ont été estimés de deux manières différentes suivant les fréquences centrales des filtres.

Pour les fréquences centrales 500, 1000 et 2000 Hz, les paramètres  $K$  et  $ERB$  ont été mesurés sur chaque individu et pour chaque oreille en utilisant la méthode des bruits à encoches [16], pour un niveau spectral de bruit blanc de 40 dB/Hz (niveau global de 80 dB de 0 à 10 kHz pour le bruit sans encoche), grâce à l'application logicielle développée par Sabourin [17]. Les mesures ont été limitées à ces trois fréquences afin de limiter la durée de test et éviter la fatigue auditive des sujets qui pourrait conduire à des réponses erronées.

Pour les fréquences centrales 125, 250, 3000 et 4000 Hz, les paramètres sont estimés par Detectsound en fonction des pertes auditives. Cette estimation est basée sur les valeurs « normales » mesurées sur 40 normoentendants [17, 18] :  $K_{Normal}$  et  $ERB_{Normal}$ . Quelles que soient les valeurs de pertes, les valeurs de  $K$  sont considérées égales à  $K_{Normal}$ . La largeur des filtres est considérée égale à  $ERB_{Normal}$  pour des pertes inférieures à 25 dB HL ; au-delà de 25 dB HL, la largeur augmente au fur et à mesure que les pertes augmentent (Voir Eq. 8 dans [10]). Le Tableau 2 présente les moyennes et écarts-types (« Std ») des valeurs des  $ERB$  et des  $K$  mesurés. Pour  $ERB$ , l'élargissement est calculé comme le rapport entre l' $ERB_{moyen}$  et  $ERB_{Normal}$ . A 500 Hz, la largeur moyenne est supérieure d'environ 10% à  $ERB_{Normal}$ . A 1000 Hz, la largeur moyenne est égale à 1% près à  $ERB_{Normal}$  mais la variabilité interindividuelle atteint 24%. A 2000 Hz, la largeur moyenne est inférieure d'environ 10% à  $ERB_{Normal}$  et la variabilité interindividuelle atteint 30%. De plus, les valeurs de  $K$  mesurées sont majoritairement inférieures à  $K_{Normal}$  ; surtout à 2000 Hz où les écarts atteignent -3,4 et -2,5 dB. Ainsi, pour les fréquences 5000, 1000 et 2000 Hz, les sujets ont en moyenne une sélectivité fréquentielle comparable à la sélectivité considérée par Detectsound pour des normoentendants.

Tableau 2 : Paramètres de sélectivité fréquentielle ( $ERB$  et  $K$ ) mesurés à 500, 1000 et 2000 Hz. « D » : oreille droite ; « G » : oreille gauche

		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
		D	G	D	G	D	G
ERB	$ERB_{moyen}$ (Hz)	101.3	105.1	161.7	166.1	307.8	324.8
	Élargissement	1.08	1.12	0.99	1.01	0.89	0.94
	Std/ $ERB_{moyen}$ (%)	17.2	10.1	24.3	24.0	31.6	27.1
K	$K_{moyen}$ (dB)	-2.4	-3.6	-1.5	-2.6	-5.5	-4.6
	Std (dB)	2.2	2.5	1.1	1.0	2.1	2.2
	$K_{moyen} - K_{normal}$ (dB)	-0.9	-2.1	0.6	-0.5	-3.4	-2.5

Pour évaluer l'effet du port de PICB, les seuils masqués avec et sans PICB ont été calculés pour chaque individu à partir de ses paramètres auditifs. Les différences obtenues par rapport au cas sans PICB sont négligeables quel que soit le PICB (BMI ou Clarity) : elles varient de -0,4 dB à +0,8 dB sur l'ensemble des tiers d'octave. Ceci s'explique par les affaiblissements relativement uniformes des deux PICB testés qui modifient peu les phénomènes de masquage par rapport au cas sans protecteur.

La Figure 6 présente les seuils (sans protecteur) calculés individuellement pour les 8 individus. Les différences entre 315 et 3150 Hz sont de l'ordre de 4 à 5 dB et atteignent au maximum 7,5 dB à 500 Hz. Des calculs complémentaires ont montré que ces différences sont dues aux paramètres de sélectivité fréquentielle (et pas à la perte d'audibilité).

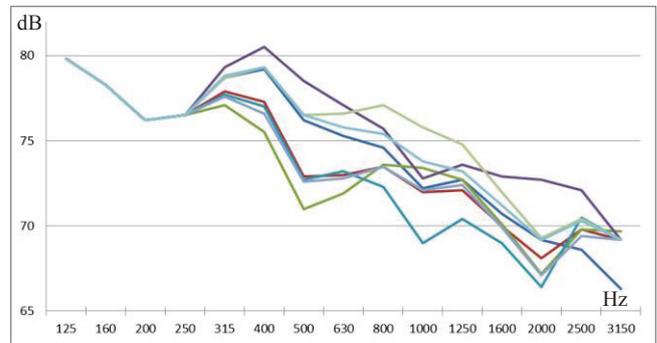


Figure 6 : seuils masqués individuels (sans protecteur) des 8 individus en fonction de la fréquence.

### 3.4 Comparaisons entre mesures et calculs de seuils masqués

Le résultat retenu des mesures des seuils masqués est le niveau pour lequel 50% des signaux ont été entendus ; il s'agit d'un niveau global. Les seuils calculés par Detectsound sont, quant à eux, exprimés en tiers d'octave. Pour pouvoir comparer les deux approches, on ajuste donc le spectre du signal de danger de manière à ce que son niveau global corresponde au seuil mesuré à 50%.

Les Figures 7, 8 et 9 présentent respectivement les comparaisons pour le signal GSM FU, RS et VACMA. Les seuils moyens mesurés et calculés sont présentés en traits pleins. De plus, pour tenir compte de la dispersion des résultats individuels, une plage de valeurs (moyenne  $\pm$  écart type) est également présentée en traits pointillés pour les mesures et pour les calculs.

Le signal GSM FU est un signal bi-tons (son aigu durant 0,2 s puis son grave durant 0,2 s) et les niveaux annoncés sont les niveaux mesurés pendant sa durée totale (0,4 s). Par conséquent, le niveau réel de chaque ton est supérieur de 3 dB au seuil mesuré. Les seuils mesurés présentés à la Figure 7 sont donc les seuils mesurés à 50% majorés de 3 dB.

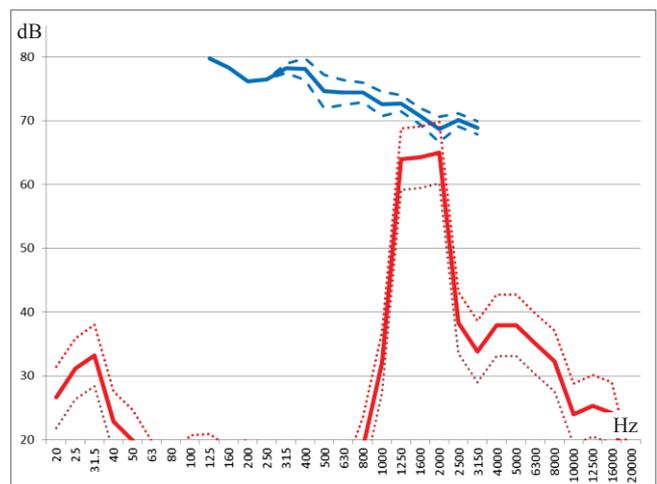


Figure 7 : Signal GSM FU. Comparaison des seuils masqués. En bleu : seuils calculés. En rouge : seuils mesurés

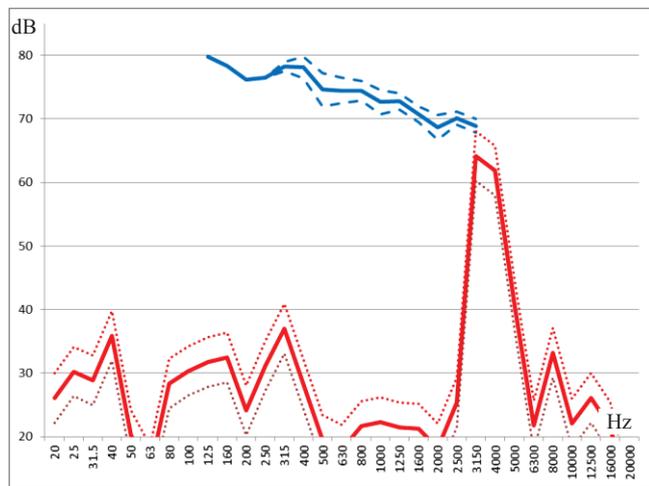


Figure 8 : Signal RS. Comparaison des seuils masqués. En bleu : seuils calculés. En rouge : seuils mesurés

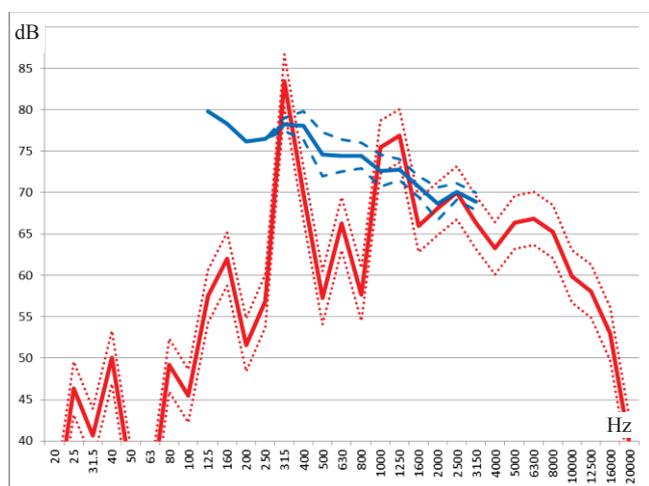


Figure 9 : Signal VACMA. Comparaison des seuils masqués. En bleu : seuils calculés. En rouge : seuils mesurés

Pour le signal GSM FU, les niveaux à 1250, 1600 et 2000 Hz correspondant au seuil moyen mesuré à 50% sont inférieurs de plus de 5 dB aux seuils calculés. Pour le signal RS, le niveau à 3150 Hz correspondant au seuil moyen mesuré à 50% est également légèrement inférieur aux seuils calculés. Ce signal a toute son énergie concentrée dans les tiers d'octave 3150 à 4000 Hz ; il n'est donc pas conforme à l'ISO 7731 qui préconise que le signal de danger comprenne des composantes dans la gamme de fréquences allant de 500 Hz à 2500 Hz (et de 500 à 1500 Hz dans le cas de pertes auditives ou du port de PICB).

Par contre, pour le signal VACMA, les seuils mesurés à 50% sont supérieurs aux seuils calculés. Une explication possible est le fait que la durée du signal est égale à la durée du bruit ambiant, si bien qu'on ne peut pas détecter l'apparition du signal dans le bruit (comme c'est le cas pour les deux autres signaux, de durée 0,4 s et qui sont centrés temporellement dans la seconde de bruit). Ainsi, on peut supposer que si la durée du signal était inférieure à 1s, les seuils mesurés seraient inférieurs.

Sur les 3 signaux testés, les écarts entre seuils mesurés et seuils calculés sont donc plus élevés que ceux trouvés dans une étude [13] où les prédictions de Detectsound pour des sons purs dans un bruit continu étaient très proches des seuils mesurés (écart maximal de -2 dB). Ces différences

peuvent être dues à la méthode de mesure des seuils qui est différente : dans [13], il s'agit d'une méthode adaptative ascendante/descendante alors que dans la présente étude il s'agit de la méthode des stimuli constants.

## 4 Conclusion

La démarche utilisée dans cette étude pour évaluer l'effet du port de PICB sur la perception de signaux de danger a consisté à comparer deux approches : des mesures et des calculs de seuils masqués.

Pour les situations étudiées (un bruit de fond, 3 signaux et deux PICB), les seuils mesurés montrent qu'en moyenne, la perception est très peu modifiée lorsque l'un des deux PICB est porté mais que les écarts-types peuvent être importants. Les faibles dégradations peuvent s'expliquer par les affaiblissements relativement uniformes des deux PICB testés, qui modifient peu les phénomènes de masquage par rapport au cas sans protecteur. D'autre part, les faibles améliorations peuvent être dues aux affaiblissements plutôt modérés des PICB testés qui n'améliorent que très peu la sélectivité fréquentielle. Étant donné les faibles effectifs (8 individus) et les variations interindividuelles importantes, il n'est pas possible dans cette étude de conclure si, dans une situation donnée, le port de protecteur améliore ou détériore en moyenne la perception. Cependant, la méthode proposée pour analyser les mesures de fonctions psychométriques devrait permettre, pour des effectifs plus grands ou pour des situations différentes, de quantifier l'amélioration ou la dégradation apportée par le port d'un protecteur. En complément, des analyses statistiques pourraient être réalisées pour évaluer si ces écarts sont significatifs.

Les calculs avec le logiciel Detectsound montrent également que les deux protecteurs testés ont peu d'influence sur la perception (les seuils masqués avec et sans PICB varient de -0,4 dB à 0,8 dB sur l'ensemble des fréquences). Concernant l'effet du statut auditif des individus, les calculs individuels de seuils masqués aboutissent à des variations non négligeables entre les individus (jusqu'à 7,5 dB à 500 Hz) qui sont dues aux paramètres de sélectivité fréquentielle. D'où l'importance de mesurer ces paramètres dans la pratique.

Les comparaisons entre seuils masqués mesurés et calculés montrent que les seuils mesurés pour les signaux GSM FU et RS sont inférieurs d'environ 5 dB aux seuils calculés. Pour le signal VACMA, les seuils mesurés sont supérieurs aux seuils calculés. Ces comparaisons sont à poursuivre sur d'autres situations pour mieux évaluer ces écarts et tenter de les expliquer. Une limite de Detectsound est qu'il ne prend pas en compte la variation de la largeur des filtres auditifs en fonction des niveaux sonores. Or on sait dans la pratique que c'est ce phénomène qui peut expliquer l'amélioration de la perception lorsqu'un protecteur est porté. Une amélioration du logiciel pourrait donc consister à prendre en compte la variation de la forme des filtres avec le niveau sonore, comme c'est le cas par exemple des filtres proposés par Moore dans la norme ANSI S3.4 [4] pour le calcul de la sonie.

Indépendamment de ces évolutions, le logiciel Detectsound permet donc de simuler une situation acoustique réellement subie par un individu et de vérifier, grâce à cette simulation, l'impact du PICB sur la détection des signaux de danger dans le bruit. Ainsi, dans le projet en cours à la SNCF, cette application permettra notamment de limiter les tests auditifs en éliminant les situations pour lesquelles l'audibilité est à coup sûr satisfaisante. Pour les situations où l'audibilité n'est pas assurée, les seuils seront mesurés grâce aux tests auditifs et comparés aux seuils calculés par Detectsound. À terme, ces comparaisons permettront d'évaluer si Detectsound permet de prédire l'effet des PICB sur un panel de signaux de danger et de bruits caractéristiques des environnements ferroviaires.

## Remerciements

Ce travail, par l'intermédiaire de l'un des auteurs, a été conduit dans le cadre du LabEx CeLyA ("Centre Lyonnais d'Acoustique", ANR-10-LABX-0060).

Les auteurs remercient Philippe DELATTRE et Jean-Marie REISER, médecins du travail à la SNCF, pour leurs analyses et leurs conseils.

## Références

- [1] J. Off. Union. Eur. 2003 ; L 42, f., *Directive 2003/10/CE du Parlement européen et du conseil du 6 février 2003 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (bruit) (dix-septième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE)*, 2003.
- [2] Wilkins, P.A. and A.M. Martin, *Hearing protection and warning sounds in industry--a review*. Applied Acoustics, 1987. **21**(4): p. 267-293.
- [3] Lazarus, H., *Signal Recognition and Hearing Protectors With Normal and Impaired Hearing*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), 2005. **11**(3): p. 233-250.
- [4] ANSI S3.4 *Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds*, 2007 (R 2012)
- [5] Kusy, A., *ND 2295 Affaiblissement acoustique in situ des protecteurs individuels contre le bruit - Étude bibliographique*. Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires, 2008. **212**: p. 43-59.
- [6] Neitzel, R.S., S.; Seixas, N., *Variability of real-world hearing protector attenuation measurements*. Ann Occup Hyg, 2006. **50**(7): p. 679-691.
- [7] Kusy, A. and J. Chatillon, *Real-world attenuation of custom-moulded earplugs: Results from industrial in situ F-MIRE measurements*. Applied Acoustics, 2012. **73**(6): p. 639-647.
- [8] NF EN ISO 7731, *Signaux de danger pour lieux publics et lieux de travail - Signaux de danger auditifs*, 2008, AFNOR: Paris.
- [9] Wittmann, H. and H. Meißner, *Einfaches Verfahren zur Beurteilung der Wahrnehmbarkeit von Rottenwarntypen beim Tragen von Gehörschutz* [Simple procedure to assess the audibility of track-layer warning signals when hearing protectors are used] (*Ear protection study, article 2, No. 10.391/1*), Müller-BBM, Editor 1986: Planegg, Germany.
- [10] Zheng, Y., et al., *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): p. 87 - 98.
- [11] Laroche, C. and C. Giguère. *Effect of hearing protection and hearing loss on warning sound design*. in *International Congress on Acoustics*. 2010. Sydney.
- [12] Moore, B.C.J. and B.R. Glasberg, *Formulae describing frequency selectivity as a function of frequency and level, and their use in calculating excitation patterns*. Hear. Res., 1987. **28**: p. 209-225.
- [13] Giguère, C.L., C.; Al Osman, R.; Zheng, Y. *Optimal Installation of Audible Warning Systems in the Noisy Workplace*. in *Proceedings of 9th Int. Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*, 2008. Mashantucket (CT), USA
- [14] ISO 4869-1, *Acoustique -- Protecteurs individuels contre le bruit -- Partie 1: Méthode subjective de mesure de l'affaiblissement acoustique*, 1990.
- [15] ISO 4869-2, *Acoustique -- Protecteurs individuels contre le bruit -- Partie 2: Estimation des niveaux de pression acoustique pondérés A en cas d'utilisation de protecteurs individuels contre le bruit*. 1994.
- [16] Stone, M.A., B.R. Glasberg, and B.C.J. Moore, *Simplified measurement of auditory filter shapes using the notched-noise method*. British Journal of Audiology, 1992. **26**(6): p. 329-334.
- [17] 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.
- [18] Gagné, A.E., M., *Validity and reliability of a computerized procedure for the measurement of auditory filters*. M.H.Sc., research project report, 2004. Audiology and Speech-Language Pathology Program, University of Ottawa.