

## **Effet de la perte auditive et du port de protecteurs auditifs sur la perception et la localisation auditive des alarmes de recul**

Véronique Vaillancourt  
Chantal Laroche  
Christian Giguère  
Hugues Nélisse

RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1171-fr



## NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

**Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.**

### Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

### Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST ([preventionautravail.com](http://preventionautravail.com))
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022  
ISBN 978-2-89797-248-6 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2022

IRSST - Direction des communications, de la veille et de la mobilisation des connaissances  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

# Effet de la perte auditive et du port de protecteurs auditifs sur la perception et la localisation auditive des alarmes de recul

Véronique Vaillancourt<sup>1</sup>  
Chantal Laroche<sup>1</sup>  
Christian Giguère<sup>1</sup>  
Hugues Nélisse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université d'Ottawa

<sup>2</sup> IRSST

RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1171-fr



## Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



#### ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs du rapport tiennent à remercier les personnes qui ont participé aux essais en laboratoire et les étudiants qui ont contribué à différentes parties de la collecte de données (Kelly Brideau, Melissa Ganguli, Adonis Naddour et Amanda D'Sylva). Les auteurs tiennent aussi à témoigner leur gratitude envers Gilles Lamothe de l'Université d'Ottawa, pour sa contribution aux analyses statistiques.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>1. ÉTAT DES CONNAISSANCES .....</b>	<b>4</b>
1.1 Constats généraux – alarmes de recul.....	4
1.2 Audibilité des alarmes de recul .....	6
1.2.1 Effet de la protection auditive chez les individus avec audition normale .....	6
1.2.2 Effet de la protection auditive chez les individus avec perte auditive .....	7
1.3 Localisation sonore des alarmes de recul .....	10
1.3.1 Effet de la protection auditive chez les individus avec audition normale .....	10
1.3.2 Effet de la protection auditive chez les individus avec perte auditive .....	12
<b>2. OBJECTIFS DE RECHERCHE .....</b>	<b>14</b>
2.1 Objectif principal .....	14
2.2 Objectifs spécifiques .....	14
<b>3. VOLET 1 – EFFET DE LA PERTE AUDITIVE ET DES PROTECTEURS AUDITIFS À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LES SEUILS DE DÉTECTION ET DE RÉACTION DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE.....</b>	<b>16</b>
3.1 Méthodologie .....	16
3.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruit.....	16
3.1.2 Protecteurs auditifs.....	19
3.1.3 Participants .....	19
3.1.4 Conditions expérimentales .....	20
3.1.5 Méthodes .....	20
3.2 Résultats.....	22
3.2.1 Statut auditif des participants.....	22
3.2.2 Données descriptives .....	23
3.2.3 Analyses statistiques .....	27
<b>4. VOLET 2 – EFFET DE LA PERTE AUDITIVE ET DES PROTECTEURS AUDITIFS À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LA LOCALISATION AUDITIVE DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE .....</b>	<b>32</b>
4.1 Méthodologie .....	32
4.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruit.....	32
4.1.2 Participants .....	33
4.1.3 Conditions expérimentales .....	33

4.1.4	Méthodes .....	34
4.2	Résultats.....	35
4.2.1	Statut auditif des participants.....	35
4.2.2	Données descriptives .....	36
4.2.3	Analyses statistiques .....	38
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION .....</b>	<b>42</b>
5.1	Effet des facteurs expérimentaux.....	42
5.1.1	Effets du type d'alarme.....	42
5.1.2	Effets des protecteurs auditifs (condition d'écoute) :.....	43
5.1.3	Effets de la perte auditive .....	44
5.2	Autres considérations .....	46
5.2.1	Effet de la durée du signal .....	46
5.2.2	Ajustement optimal des alarmes de recul .....	46
5.3	Limites de l'étude :.....	47
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>49</b>
	Constats généraux.....	49
	Recommandations : .....	50
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>52</b>
	<b>ANNEXE A .....</b>	<b>64</b>
A.1	Consignes pour la mesure des seuils de détection et des seuils de réaction .....	64
	<b>ANNEXE B .....</b>	<b>66</b>
B.1	Seuils audiométriques à l'oreille droite (cercles) et à l'oreille gauche (symboles x) des participants dans les quatre catégories de perte auditive (PA1 à PA4).....	66

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Résultats de l'ANOVA pour les seuils de détection et description de la grandeur de l'effet. ....	28
Tableau 2.	Résultats de l'ANOVA pour les seuils de réaction et description de la grandeur de l'effet. ....	30
Tableau 3.	Classification des participants selon leur perte auditive.....	36
Tableau 4.	Résultats de l'ANOVA pour les performances en localisation sonore et description de la grandeur de l'effet. ....	39
Tableau 5.	Sommaire des effets du facteur Type d'alarme .....	42
Tableau 6.	Sommaire des effets du facteur Condition d'écoute .....	43
Tableau 7.	Sommaire des effets du facteur Groupe.....	44
Tableau 8.	Rapports S/B (en dB) permettant d'assurer une réaction adéquate chez 75 % des individus. ....	47



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Contenu spectral de l’alarme tonale (GROTE 73030) et de l’alarme à large bande (BBS-107). .....	17
Figure 2.	Trace temporelle des deux alarmes de recul sur une durée de trois secondes. ....	17
Figure 3.	Analyse spectrale en bandes de tiers d’octave du bruit de copeaux de bois (LZeq en fonction de la fréquence sur la durée totale du bruit).....	18
Figure 4.	Caractéristiques temporelles du bruit de copeaux de bois par segment de 25 ms (LAeq 25ms).....	18
Figure 5.	Seuils audiométriques moyens à la meilleure oreille en fonction de la fréquence pour chacune des catégories de statut auditif.....	23
Figure 6.	Seuils de détection dans le silence par condition d’écoute et type d’alarme de recul pour les deux groupes de participants .....	24
Figure 7.	Seuils de détection et de réaction dans le bruit par condition d’écoute et type d’alarme de recul pour les deux groupes de participants .....	25
Figure 8.	Diagramme « <i>Box &amp; Whiskers</i> » par condition d’écoute et type d’alarme de recul pour les seuils de détection dans le bruit pour les deux groupes de participants. ....	25
Figure 9.	Diagramme « <i>Box &amp; Whiskers</i> » par condition d’écoute et type d’alarme de recul pour les seuils de réaction dans le bruit pour les deux groupes de participants. ....	26
Figure 10.	Positionnement des haut-parleurs, du participant et de la tablette sur trépied (tâche connexe) pour les épreuves de localisation. ....	34
Figure 11.	Tâche connexe accomplie par les participants – <i>Tower of London Test</i> .....	35
Figure 12.	Pourcentage moyen de bonnes réponses par condition d’écoute et type d’alarme de recul pour les deux groupes de participants (niveau de chance = 12,5 %). ....	37
Figure 13.	Diagramme « <i>Box &amp; Whiskers</i> » par condition d’écoute et type d’alarme de recul pour les deux groupes de participants (niveau de chance = 12,5 %). .....	37
Figure 14.	Effet du facteur Condition d’écoute (panneau de gauche : logit ; panneau de droite : pourcentages estimés de bonnes réponses). ....	40
Figure 15.	Effet du facteur Type d’alarme (panneau de gauche : logit ; panneau de droite : pourcentages estimés de bonnes réponses). ....	41
Figure 16.	Effet du facteur Groupe (panneau de gauche : logit ; panneau de droite : pourcentages estimés de bonnes réponses).....	41

## SOMMAIRE

Chaque année, des travailleurs se font heurter par un véhicule qui manœuvre en marche arrière. Certaines caractéristiques des alarmes de recul conventionnellement utilisées en milieu de travail (alarmes tonales « *bip-bip* ») compromettent leur performance à avertir adéquatement les travailleurs de l'approche d'un véhicule, du moins comparativement aux plus récentes alarmes à large bande (« *pshit-pshit* »). On cite trois principaux désavantages de l'alarme tonale, soit une plus grande difficulté à localiser la provenance du signal sonore dans l'espace, un patron de propagation sonore irrégulier derrière le véhicule lourd, ainsi qu'une nuisance sonore (ou pollution sonore) accrue.

Des études antérieures financées par l'IRSST ont démontré la supériorité de l'alarme à large bande pour les individus avec audition normale, porteurs ou non de protecteurs auditifs. La présence de perte auditive chez les travailleurs étant une réalité incontournable des milieux de travail bruyants, le but de la présente étude (IRSST/Université d'Ottawa) est d'évaluer l'impact de la surdité sur la perception et la localisation des alarmes de recul en combinaison avec le port de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles, en mode passif ou à rétablissement de son). La méthodologie utilisée est similaire à celle utilisée dans les projets antérieurs qui impliquaient des auditeurs normaux qui portaient ou non des protecteurs auditifs. La mesure du seuil de détection vise à déterminer le niveau sonore de l'alarme le plus faible perçu dans un bruit de fond de 80 dBA. La mesure du seuil de réaction vise, quant à elle, à déterminer le niveau sonore de l'alarme (en présence d'un bruit de fond de 80 dBA) qui éliciterait une réaction qui, sur le terrain, consisterait à se tourner vers le véhicule ou à se déplacer hors de la zone de danger. En ce qui concerne la mesure des capacités de localisation sonore, elle vise à déterminer le pourcentage d'identification correcte de la provenance de l'alarme ainsi que les erreurs de types avant-arrière et gauche-droite.

À l'issue de cette étude, et compte tenu des études précédentes financées par l'IRSST (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019), les recommandations suivantes peuvent être formulées dans le contexte de l'utilisation des alarmes de recul et des protecteurs auditifs en milieu de travail bruyant, pour les auditeurs avec audition normale et avec perte auditive :

- L'alarme à large bande devrait être privilégiée en raison de son avantage important pour la localisation sonore et des seuils de réaction généralement moins élevés qu'avec l'alarme tonale, surtout lors du port de protecteurs auditifs.
- Les protecteurs à rétablissement de son devraient être considérés puisqu'ils peuvent améliorer de façon significative les seuils de détection dans le silence et les seuils de réaction dans le bruit comparativement aux protecteurs passifs.
- Lorsque la localisation sonore est critique pour assurer la sécurité des travailleurs :
  - les bouchons sont recommandés puisque les coquilles semblent nuire davantage aux indices de localisation sonore ;
  - il est recommandé d'offrir une sélection de produits aux travailleurs étant donné qu'il existe des différences importantes entre les différents protecteurs auditifs

pouvant influencer la localisation auditive, particulièrement en ce qui concerne les protecteurs à rétablissement de son (p. ex., position des microphones) ;

- il est recommandé d'offrir une période d'adaptation ou d'essai aux travailleurs étant donné que les performances en localisation sonore varient grandement d'un individu à l'autre, particulièrement chez les participants avec perte auditive.
- On recommande la méthodologie de la norme ISO 9533 pour l'ajustement du niveau sonore des alarmes de recul, en prenant en considération les éléments suivants afin d'assurer une réaction adéquate chez la majorité des travailleurs (audition normale et perte auditive) :
  - un rapport S/B de 0 dB dans la zone de danger à l'arrière du véhicule est adéquat sans protection auditive,
  - pour les travailleurs qui utilisent des protecteurs auditifs passifs ou des protecteurs auditifs à rétablissement de son en mode passif (OFF/éteint) le niveau de l'alarme devrait être ajusté à un rapport S/B d'environ 10 dB pour l'alarme tonale. Pour l'alarme à large bande, ce niveau pourrait être réduit de 3 dB,
  - lors de l'utilisation des protecteurs à rétablissement de son, le niveau de l'alarme devrait être ajusté à un S/B d'environ 5 dB,
  - il faut inclure toutes les sources de bruit de l'environnement de travail lors de la mesure du bruit de fond et pas seulement le bruit du moteur du véhicule (seule source de bruit mentionnée dans la norme ISO 9533), sur lequel l'alarme est installée.

Il est important de noter que les recommandations quant aux protecteurs auditifs sont basées sur les résultats obtenus sur un nombre limité de protecteurs auditifs fonctionnels et bien ajustés. Il faut donc exercer une certaine prudence quant à la généralisation à d'autres produits disponibles sur le marché et des contraintes d'utilisation typiques rencontrés dans les divers milieux qui pourraient compromettre la performance de ces protecteurs tant en localisation sonore qu'en détection/réaction. Par exemple, un protecteur défectueux ou mal ajusté d'un côté pourrait nuire particulièrement à la localisation sonore, tout comme le fait de retirer un protecteur d'un seul côté dans le but d'améliorer la communication.

Puisque l'ajustement du niveau de l'alarme demeure une problématique importante en pratique, il est primordial de ne pas limiter les efforts de prévention des accidents à l'utilisation unique des alarmes de recul. Bien que l'alarme sonore de recul demeure obligatoire sur la plupart des véhicules lourds et reste un moyen largement utilisé pour prévenir et alerter les personnes œuvrant à proximité d'un véhicule lourd, elle ne peut à elle seule assurer la protection et la sécurité des travailleurs. Il est important de préconiser une meilleure conception des plans de circulation et une réduction notable, voire l'élimination, des manœuvres de recul, ainsi que l'utilisation d'autres technologies (p.ex., détecteurs d'obstacles, haut-parleur paramétrique qui permet de circonscrire le signal d'alarme dans la zone de danger tout en limitant la nuisance environnementale).

## INTRODUCTION

Le présent rapport porte sur un type particulier d'accidents en milieu de travail, soit celui de travailleurs heurtés par un véhicule effectuant une manœuvre de recul, ce qui demeure une cause importante d'accidents et de décès partout dans le monde (NHTSA, 2006 ; Lingard *et al.*, 2013 ; Hinze et Teizer, 2011 ; Purswell et Purswell, 2001, 2011).

Certaines caractéristiques des alarmes de recul conventionnellement utilisées en milieu de travail (alarmes tonales « *bip-bip* ») compromettent leur performance à avertir adéquatement les travailleurs de l'approche d'un véhicule, du moins comparativement aux plus récentes alarmes à large bande (« *pshit-pshit* ») (Morgan et Peppin, 2008 ; Army Corps of Engineers, 2009 ; Holzman, 2011 ; Brammer et Laroche, 2012 ; Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Vaillancourt *et al.*, 2013 ; Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019). On cite trois principaux désavantages de l'alarme tonale, soit une plus grande difficulté à localiser la provenance du signal sonore dans l'espace, un patron de propagation sonore irrégulier derrière le véhicule lourd, ainsi qu'une nuisance sonore (ou pollution sonore) accrue. Une utilisation de plus en plus fréquente de l'alarme à large bande est constatée au Québec (Neill, 2016), au Canada (CTVNews, 2018 ; Victoria Times, 2016 ; CBC News, 2019) et dans d'autres pays (Burgess et McCarty, 2009), principalement en raison de sa nuisance environnementale moins prononcée.

Les résultats des études financées par l'IRSST qui visaient à comparer l'efficacité des alarmes de recul de type tonale et à large bande dans un contexte de sécurité au travail se résument comme suit. Une première étude (Vaillancourt *et al.*, 2012), qui incorporait des essais laboratoires et sur le terrain, a démontré que l'alarme à large bande est conforme à la norme SAE J994 (SAE, 2009), que son patron de propagation sonore est plus régulier derrière les véhicules, et que la provenance de ce type de signal est plus facile à localiser dans l'espace. Certains avantages de l'alarme tonale (détection du signal à de plus faibles niveaux sonores et degré d'urgence plus facilement évoqué dans certaines situations d'écoute), étaient plutôt éclipsés par les fortes variations (de l'ordre de 15-20 dB) du niveau sonore notées sur de très courtes distances dans la zone immédiate de danger.

Une seconde étude (Nélisse *et al.*, 2017) a confirmé le champ sonore plus homogène de l'alarme à large bande derrière les véhicules lourds, même dans des conditions d'installation non optimale, ainsi que la supériorité de l'alarme à large bande lors de tâches de localisation sonore, et ce, même lorsque le récepteur accomplit une tâche et doit localiser deux alarmes simultanément. Par ailleurs, une analyse des seuils de détection et de réaction<sup>1</sup>, mesurés chez des individus avec une audition normale, a permis de mettre en évidence qu'il n'y aurait aucune contre-indication à l'utilisation de l'alarme à large bande dans les milieux de travail bruyant si elle est ajustée selon les prescriptions de la norme ISO 9533 (ISO, 2010), du moins pour les travailleurs qui ont une audition normale et qui ne porte pas de protecteurs auditifs. Sur la base des résultats, plusieurs recommandations ont été formulées pour une utilisation optimale des alarmes de recul en milieu de travail bruyant.

Une troisième étude (Vaillancourt *et al.*, 2019) a repris la méthodologie du second projet afin de mesurer les seuils de détection, les seuils de réaction, et les performances en localisation sonore chez des individus avec audition normale portant un casque de sécurité et des protecteurs auditifs (passifs et à rétablissement de son). Les résultats ont confirmé que l'alarme à large bande est plus facile à localiser que l'alarme tonale et démontré que la réaction de retrait se manifeste à des rapports S/B (Signal/Bruit) inférieurs, avec et sans protection auditive. De façon générale, les performances sans protection auditive étaient meilleures que celles obtenues lors du port des protecteurs auditifs passifs et à rétablissement de son. Les seuils de réaction étant moins sensibles aux caractéristiques temporelles et spectrales des bruits, les auteurs ont préconisé une méthode d'ajustement du niveau des alarmes de recul basée sur le niveau global du bruit (incluant toutes les sources de bruit autour du véhicule), en ajoutant quelques dB au-dessus du critère recommandé dans la norme ISO 9333 (soit un rapport S/B = 0 dB) lorsque des protecteurs auditifs sont utilisés par des travailleurs qui ont une audition normale.

Toutes les études citées précédemment portaient sur des individus avec audition normale. Or, on sait que des millions de travailleurs sont exposés quotidiennement au bruit nocif dans leur milieu de travail et que plusieurs d'entre eux développent une surdité professionnelle (WHO, 2000). Au Québec, 36 188 cas de surdité professionnelle ont été

---

<sup>1</sup> Le seuil de détection réfère au plus faible niveau sonore de l'alarme nécessaire pour être tout juste audible dans le bruit, alors que le seuil de réaction représente le niveau sonore de l'alarme qui est suffisamment fort pour inciter le travailleur à se tourner vers le véhicule (réaction immédiate) ou à se déplacer hors de la zone de danger (retrait immédiat). Ces seuils sont exprimés en un rapport signal-sur-bruit (S/B), soit le niveau du signal relatif à celui du bruit dans lequel il est émis (signal – bruit = rapport S/B).

reconnus par la Commission de la santé et de la sécurité du travail de 1997 à 2010, avec une hausse importante de cas entre le début et la fin de la période d'observation (INSPQ, 2014). La situation semble évoluer dans le même sens partout au Québec. Par exemple, dans la région de la Capitale-Nationale, le nombre annuel de cas de surdité professionnelle a augmenté de façon significative, de 109 en 2002 à 829 en 2016, pour dénombrer un total de 5 373 cas de surdité professionnelle reconnus par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail durant cette période de 15 ans (Laliberté, 2019). Du côté américain, le *Centers for Disease Control and Prevention* (Masterson *et al.*, 2016) a établi que le secteur des mines présentait la plus haute prévalence d'incapacité auditive (17 %), suivi du secteur de la construction avec 16 % de prévalence, soit deux secteurs d'activités très développés au Québec et où les alarmes de recul sont largement utilisées.

Par ailleurs, le vieillissement de la population ([www.populationpyramid.net](http://www.populationpyramid.net)) fait en sorte que la proportion de travailleurs avec surdité est en croissance dans plusieurs régions industrialisées, comme le Québec. Quelle qu'en soit l'origine, la surdité peut compromettre la perception et la localisation de sources sonores, telles que les alarmes de recul. Depuis plusieurs années déjà, des chercheurs soulèvent des préoccupations quant à la perception et la localisation des alarmes de recul par des travailleurs atteints de surdité, portant ou non des protecteurs auditifs (Robinson et Casali, 1995), plus spécifiquement dans le domaine de la construction.

La présence de perte auditive chez les travailleurs ainsi que le port de protecteurs auditifs étant donc deux réalités incontournables des milieux de travail bruyants, le but de cette étude (IRSST/Université d'Ottawa) est d'évaluer l'impact de la surdité sur la perception et la localisation des alarmes de recul en combinaison avec le port de protecteurs auditifs.

# 1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les recherches précédentes (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019) présentent plusieurs aspects théoriques et pratiques associés à la détection et la localisation de sources sonores. La première section de l'état des connaissances présente des constats généraux qui permettent de mettre en lumière certaines comparaisons entre les alarmes de recul tonale et à large bande. Par la suite, les effets du port de protecteurs auditifs et de la présence d'une perte auditive sur les seuils de détection et de réaction, ainsi que sur les capacités de localisation sonore sont détaillés.

## 1.1 Constats généraux – alarmes de recul

Derrière un véhicule lourd, des variations significatives du niveau de pression sonore sur de très courtes distances peuvent atteindre jusqu'à 20 dB avec l'alarme tonale (Laroche *et al.*, 1995 ; Laroche et Lefebvre, 1997, 1998 ; Laroche, 2006 ; Vaillancourt *et al.*, 2013 ; Nélisse *et al.*, 2017). Ces variations du niveau de l'alarme peuvent entraîner des difficultés pour les travailleurs à détecter l'alarme, mais surtout des confusions à savoir si le véhicule s'approche ou s'éloigne. Le patron de propagation de l'alarme à large bande derrière les véhicules lourds est beaucoup plus homogène (Vaillancourt *et al.*, 2013), même lorsque l'endroit où est installée l'alarme sur le véhicule n'est pas optimal (Nélisse *et al.*, 2017).

Selon Homer (2008), les similarités spectrales observées entre l'alarme à large bande et les bruits typiques des milieux de travail pourraient rendre ce type d'alarme plus susceptible au masquage que les alarmes tonales dans des environnements sonores élevés. Les rapports de recherche publiés par l'IRSST (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019) ont par ailleurs démontré que les seuils de détection dans le bruit étaient plus faibles (meilleurs), de quelques décibels, pour l'alarme tonale que pour l'alarme à large bande dans 12 bruits industriels ayant des caractéristiques spectrales et temporelles variées. Ces dernières études ont toutefois indiqué que cela ne présenterait pas un avantage réel de l'alarme tonale par rapport à l'alarme à large bande pour la sécurité des travailleurs dans des conditions terrain, compte tenu de la meilleure homogénéité du champ sonore que procure cette dernière. Puisque les seuils de détection variaient entre environ -15 à -30 dB S/B pour un ensemble de conditions de bruit, les auteurs ont conclu que les alarmes demeureraient audibles à des niveaux significativement inférieurs à celui du bruit de fond. Par ailleurs, les résultats indiquaient que les seuils de réaction sont moins sensibles au contenu spectral et temporel des bruits que les seuils de détection et qu'ils étaient généralement plus faibles (meilleurs) pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale. Par conséquent, l'alarme à large bande semble mieux convenir pour assurer la sécurité des travailleurs en les incitant à se retirer de la zone de danger.

La norme ISO 9533 stipule, quant à elle, que les niveaux de pression sonore mesurés quand l'alarme est activée et que le moteur fonctionne à faible régime (au neutre) doivent être égaux ou supérieurs à ceux mesurés quand le véhicule est en marche avec le moteur qui tourne à haut régime et que l'alarme est éteinte (soit un rapport S/B  $\geq 0$  dB), et ce, à 7 différents points de mesure derrière le véhicule. Alors que Homer (2008) avait démontré un avantage de l'alarme tonale, une étude menée par le *Department for Transport, Energy and Infrastructure* (Basset Consulting Engineers, 2009) a documenté non seulement la conformité de l'alarme à large bande à la norme australienne AS 4742-2003 (équivalente à ISO 9533), mais également la plus grande directivité de son signal comparativement aux alarmes tonales. Popoff-Asotoff *et al.* (2012) ont également démontré que les alarmes auto ajustables à large bande rencontrent les exigences de la norme lorsqu'elles sont bien installées sur le véhicule, alors qu'une proportion importante des alarmes tonales n'étaient pas conformes. Les auteurs des rapports publiés par l'IRSST (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019) indiquent que les alarmes de recul devraient être clairement audibles pour des individus avec audition normale qui ne portent pas de protecteurs auditifs, si elles sont ajustées selon les recommandations de la norme ISO 9533 (S/B  $\geq 0$  dB). Ces mêmes auteurs recommandent toutefois d'intégrer toutes les sources de bruit présentes dans l'environnement dans la mesure du bruit de fond à l'arrière du véhicule (et non pas seulement le bruit du véhicule avec moteur à haut régime), et d'ajouter jusqu'à 7 dB au rapport S/B de 0 dB si des protecteurs auditifs sont utilisés chez des individus avec audition normale (Vaillancourt *et al.*, 2019).

En général, les signaux riches en composantes fréquentielles sont plus faciles à localiser dans l'espace qu'un signal ayant un contenu spectral plus limité (Butler et Planert, 1976), et les avertisseurs sonores ne font pas exception à cette règle (Withington 1996, 1999, 2000, 2004 ; Withington et Paterson, 1998 ; Catchpole *et al.*, 2004 ; Casali et Alali, 2010 ; Alali et Casali, 2011 ; Alali, 2011 ; Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Vaillancourt et al, 2013 ; Vaillancourt *et al.*, 2019), même lorsque le récepteur accomplit une tâche et qu'il doit localiser deux alarmes simultanément (Nélisse *et al.*, 2017).

Kilpatrick (2017) a comparé l'efficacité des deux types d'alarmes en utilisant une approche différente, soit par l'entremise d'un sondage effectué auprès de diverses parties prenantes (travailleurs, opérateurs de chariot élévateur, employés de maintenance et gestionnaires) d'une importante compagnie d'acier américaine couvrant 55 emplacements différents qui utilisent l'alarme à large bande depuis au moins 2 ans. Dans une section du sondage, huit caractéristiques désirables d'une alarme de recul ont été présentées aux participants. Ces derniers devaient choisir, entre l'alarme tonale et l'alarme à large bande, le type d'alarme le mieux représenté par chacun des énoncés. Dans 61 % des réponses, l'alarme à large bande a été sélectionnée, comparativement à seulement 33 % pour l'alarme tonale. Dans 6 % des réponses, aucune des deux alarmes n'avait été identifiée. Les parties prenantes semblent donc privilégier l'alarme à large bande dans la prévention des accidents au travail. Une telle préférence pour l'alarme à large bande avait également été notée dans le cadre d'une enquête téléphonique menée auprès de huit compagnies différentes (Basset Consulting Engineers, 2009).



## 1.2 Audibilité des alarmes de recul

### 1.2.1 Effet de la protection auditive chez les individus avec audition normale

Chez des individus avec audition normale, les protecteurs auditifs ne semblent pas nuire à la détection des alarmes de recul dans le bruit, pouvant parfois même l'améliorer (Casali *et al.*, 2004 ; Casali et Wright, 1995 ; Muchenje, 2008 ; Vaillancourt *et al.*, 2012, 2013). Par exemple, dans un bruit de 85 dBA, Casali *et al.* (2004) ont mesuré des seuils plus faibles pour la détection d'une alarme de recul tonale d'environ 3-4 dB dans des conditions de protection auditive comparativement à la condition sans protection. Cette amélioration a également été notée pour la détection d'autres signaux sonores et la perception de la parole dans des niveaux de bruit élevés (Abel *et al.*, 1985 ; Suter, 1989 ; Arz *et al.*, 2018, 2019, 2021 ; Lazarus, 2005 ; Giguère *et al.*, 2010).

Malgré cet avantage en détection sonore dans des environnements de bruits assez élevés, le port de protecteurs auditifs offrant une forte atténuation sonore peut réduire la distance à laquelle les individus peuvent détecter une alarme de recul dans un environnement relativement silencieux comparativement à une condition sans protection auditive, laissant alors moins de temps aux travailleurs pour réagir (Lancaster *et al.*, 2007 ; Alali, 2011 ; Alali et Casali, 2012). La distance de détection a également été étudiée pour d'autres stimuli sonores (Casali *et al.* 2009 ; Clasing et Casali, 2014) et les résultats indiquent qu'en général, les protecteurs auditifs spécialisés qui offrent une plus grande atténuation sur les hautes fréquences réduisent davantage la distance de détection comparativement à l'oreille nue, surtout si le stimulus sonore est riche en hautes fréquences.

Les protecteurs actifs (qui utilisent des moyens électroniques pour améliorer ou réguler la réduction du bruit ou d'autres fonctions) ne semblent pas offrir un avantage significatif comparativement aux protecteurs passifs en ce qui a trait à la détection sonore dans le bruit (Casali et Wright 1995 ; Christian, 1999 ; Casali *et al.*, 2004 ; Muchenje, 2008 ; Vaillancourt *et al.* 2019) et à la distance de détection (Alali et Casali, 2012) des alarmes de recul.

Alors que les protecteurs auditifs ne semblent pas nuire aux capacités de détection dans le bruit chez les individus avec audition normale, leur impact sur la perception et la reconnaissance des alarmes est différent à des niveaux sonores supraseuils (au-delà des seuils masqués). Par exemple, Vaillancourt *et al.* (2012, 2013) ont obtenu des évaluations réduites du degré d'urgence ressenti à des niveaux au-delà des seuils masqués avec des protecteurs auditifs passifs, comparativement à une condition sans protection auditive. Les protecteurs actifs en mode rétablissement de son peuvent, comparativement au mode passif, présenter un certain avantage pour les seuils de réaction, mais ne permettent pas d'atteindre des performances similaires à celles obtenues sans protection auditive (Vaillancourt *et al.*, 2019).

Dans leur rapport publié par l'IRSST, Vaillancourt *et al.* (2019) ont mesuré les seuils de détection et les seuils de réaction de deux types d'alarmes de recul (tonale et à large bande) dans divers bruits présentés à 80 dBA chez des individus avec audition normale, avec et sans protecteurs auditifs (passifs : coquilles 3M PELTOR 95 et bouchons 3M E-A-R ultrafit ; à rétablissement de son : coquilles 3M PELTOR Protac III, coquilles Howard Leight IMPACT H, et bouchons 3M PELTOR Tactical). Dans le cas des protecteurs à rétablissement de son, les mesures ont été effectuées en mode passif et pour deux ajustements du contrôle de volume. Les résultats ont démontré que les deux types d'alarmes de recul demeurent audibles à des niveaux sonores largement inférieurs au bruit, avec et sans protecteurs auditifs, avec des seuils de détection moyens de l'ordre de -12 à -25 dB S/B. Les seuils de réaction moyens étaient quant à eux de l'ordre de -5 à 0 dB S/B sans protecteurs auditifs, et de -4 à +4 dB S/B avec protection auditive. De façon générale, les seuils de détection étaient plus faibles (meilleurs) pour l'alarme tonale que l'alarme à large bande, alors qu'on notait un avantage pour l'alarme à large bande au niveau des seuils de réaction dans plusieurs conditions d'écoute. La variation notée en fonction du type de bruit était plus grande pour les seuils de détection que pour les seuils de réaction. Par ailleurs, les protecteurs auditifs passifs ont contribué à une légère amélioration des seuils de détection dans certains bruits, mais une détérioration significative des seuils de réaction (jusqu'à 9 dB pour l'alarme tonale et 6 dB pour l'alarme à large bande). En mode de rétablissement de son, particulièrement avec le volume plus élevé, les deux types de protecteurs utilisés (bouchons et coquilles) ont fait augmenter (détérioré) le seuil de détection comparativement aux conditions sans protection et avec le protecteur en mode passif. Comme attendu, les seuils de réaction mesurés avec les bouchons utilisés en mode de rétablissement de son étaient plus faibles (meilleurs) qu'en mode passif et s'approchaient graduellement des valeurs obtenues sans protection auditive avec une augmentation du volume. Avec les coquilles à rétablissement de son, des seuils de réaction plus élevés (détériorés) ont également été obtenus dans les différents modes d'opération comparativement à la condition sans protection auditive, mais contrairement aux bouchons, les seuils de réaction étaient relativement similaires, peu importe le mode d'opération utilisé.

Une analyse des données en lien avec les exigences de la norme ISO 9533 a démontré que cette dernière pourrait être utilisée pour guider l'ajustement du niveau sonore des alarmes de recul sur le terrain, à la condition d'inclure toutes les sources de bruit autour du véhicule dans la définition du bruit de fond et d'ajouter environ 7 dB à l'exigence actuelle (rapport S/B  $\geq$  0 dB) lors de l'utilisation de protecteurs auditifs, particulièrement en mode passif, pour des individus avec audition normale.

### **1.2.2 Effet de la protection auditive chez les individus avec perte auditive**

Le port de protecteurs auditifs peut nuire à la détection de signaux avertisseurs sonores chez des individus avec perte auditive (Wilkins, 1984 ; Wilkins et Martin, 1987 ; Arz *et al.*, 2019, 2021 ; El Sawaf *et al.*, 2019), cet effet pouvant dépendre du contenu fréquentiel du signal (Abel *et al.*, 1985) ainsi que de la configuration de la perte auditive (Wilkins et

Martin, 1987). Par exemple, dans Abel *et al.* (1985), le port de protecteurs auditifs a augmenté de façon significative le seuil de détection (comparativement au seuil masqué sans protection auditive) chez des gens avec perte auditive pour un signal tiers d'octave centré sur 3 000 Hz mais pas pour un signal centré sur 1 000 Hz. Les auteurs expliquent ce phénomène par le fait que le signal (ainsi que le bruit) est atténué par le protecteur auditif à un niveau inférieur au seuil d'audition déjà compromis par la perte auditive qui se manifeste davantage en hautes fréquences chez plusieurs individus.

Seulement deux études semblent avoir porté spécifiquement sur l'audibilité des alarmes de recul chez des individus avec une perte auditive lors du port de protecteurs auditifs. Robinson et Casali (1995) cherchaient à savoir si une alarme de recul tonale demeurait audible chez cinq individus avec audition normale, deux individus avec une perte auditive légère [moyenne des sons purs (MSP) de 500 à 2 000 Hz entre 20 et 40 dB HL]) et cinq individus avec une perte auditive significative (MSP 500-2 000 Hz entre 40 et 60 dB HL), malgré l'utilisation d'une coquille passive caractérisée par une atténuation élevée (IRB = 29 dB), dans des conditions de bruit de fond (bruit rose à 85, 90 et 95 dBA) où le port de protecteurs auditifs pourrait être exigé. Les mesures ont été effectuées à quatre différents rapports S/B (0, -8, -16 et -24 dB). L'étude ne cherchait pas à documenter les différences entre la capacité à détecter le signal avec et sans protection auditive, mais plutôt de déterminer si la détection varie en fonction du statut auditif, du niveau de bruit et du rapport S/B. Les résultats ont révélé une différence significative dans les performances des trois groupes de sujets aux trois plus faibles rapports S/B, mais pas à 0 dB. En général, des performances plus faibles ont été obtenues pour le groupe avec perte auditive significative à -8 et -16 dB S/B, comparativement aux deux autres groupes. Au plus faible rapport S/B (-24 dB S/B), de moins bons résultats ont été obtenus pour les deux groupes avec perte auditive, comparativement à celui avec audition normale, les deux groupes avec perte étant similaires. Sur la base des résultats, les auteurs ont conclu qu'une alarme tonale présentée à 0 dB S/B devrait être entendue par des individus avec une perte auditive ne dépassant pas 45-50 dB HL, même lors du port d'un protecteur auditif offrant une forte atténuation, du moins dans des niveaux de bruit égaux ou supérieurs à 85 dBA.

Pour sa part, Muchenje (2008) a mesuré les seuils masqués d'une alarme de recul tonale lors du port de deux protecteurs auditifs à rétablissement de son (coquilles *Bilsom Impact* et *Peltor TacticalPro*), utilisés au gain maximal, et leur équivalent passif (*Bilsom Clarity C2* et *Peltor H7*) chez huit individus avec audition normale et trois individus avec perte auditive exposés à divers niveaux de bruit de fond (75, 85, 95 et 105 dBA). Puisque l'objectif était de déterminer si les protecteurs auditifs à rétablissement de son offraient un avantage en détection sonore comparativement aux protecteurs passifs, les seuils masqués sans protection auditive n'ont pas été mesurés. Sur l'ensemble des résultats, il a été déterminé que le signal de l'alarme devait être environ 10 dB plus élevé pour être entendu par les individus avec perte auditive que par ceux avec audition normale. Comparativement à leur équivalent passif, les seuils masqués obtenus avec les protecteurs auditifs à rétablissement de son étaient environ 3 dB plus élevés (pires).

Ce résultat va à l'encontre de l'hypothèse des auteurs à l'effet que ces produits seraient associés à de meilleurs seuils masqués pour tous les individus dans des niveaux de bruit inférieurs à 85 dBA, alors que les seuils seraient équivalents à ceux des protecteurs passifs dans des bruits plus élevés. Les résultats ont par contre démontré un avantage des protecteurs passifs à 75, 85 et 95 dBA, alors qu'aucune différence significative n'a été notée dans un bruit de 105 dBA.

Même si elles ne portent pas spécifiquement sur la détection des alarmes de recul, quelques études méritent une attention particulière, car elles portent sur l'effet du port de protecteurs auditifs sur la perception d'avertisseurs sonores chez des gens avec perte auditive.

Lazarus (2005) a estimé l'effet de divers paramètres sur les seuils masqués de signaux entendus (détection sonore et de signaux reconnus (identification sonore)). Cet effet pouvait atteindre des variations dans les seuils de 5 dB pour le niveau et le spectre du bruit, 8 dB pour la protection auditive, 3 dB pour la nature du signal, et 10 dB pour la perte auditive. Dans cette étude, les seuils d'identification étaient approximativement 3-7 dB plus élevés que les seuils de détection. Sur la base des résultats, l'auteur a conclu qu'un rapport S/B de 5 à 10 dB est nécessaire pour assurer une identification adéquate des signaux sonores, mais que pour des gens avec perte auditive qui utilisent des coquilles et qui doivent identifier une variété de signaux sonores, un rapport S/B de 10-15 dB pourrait être nécessaire.

Arz *et al.* (2019, 2021) ont examiné l'effet du port de protecteurs auditifs (bouchons moulés en silicone et coquilles passives) sur l'audibilité de signaux avertisseurs utilisés dans le cadre d'activités ferroviaires. En présence d'un bruit de fond de 86 dBA principalement en basses fréquences, les seuils de détection pour différents types de signaux avertisseurs ont été mesurés chez 15 individus avec audition normale et 60 individus avec perte auditive (profils variés). Comparativement aux seuils masqués sans protection auditive, une amélioration d'environ 2 dB a été notée chez les auditeurs normaux lors du port de protecteurs auditifs, alors que la dégradation du seuil masqué occasionnée par la protection auditive augmentait avec le degré de la perte auditive. Par ailleurs, selon ces auteurs, le contenu spectral du signal est important à considérer, l'effet combiné de la perte auditive et de la protection auditive étant relativement faible pour les signaux riches en basses fréquences (< 500 Hz). Les auteurs ont attribué ce résultat aux meilleurs seuils d'audition en basses fréquences ainsi qu'à la faible atténuation des protecteurs auditifs dans cette zone fréquentielle. À l'inverse, la détérioration des seuils masqués pour un signal composé de deux sons purs (3 430 et 4 084 Hz) a atteint jusqu'à 10 dB pour les bouchons et 13 dB pour les coquilles dans le groupe d'individus ayant une perte auditive plus prononcée. Finalement, les auteurs ont conclu que la sécurité des travailleurs avec perte auditive ne devrait pas être compromise si la moyenne des sons purs à 500, 1 000 et 2 000 ne dépasse pas 25 dB HL dans la meilleure oreille.

## 1.3 Localisation sonore des alarmes de recul

### 1.3.1 Effet de la protection auditive chez les individus avec audition normale

En plus d'accroître le temps de réaction lors des tâches de localisation sonore (Bolia et MacKinley, 2000 ; Talcott *et al.*, 2012), l'utilisation de protecteurs auditifs dégrade généralement les performances (Abel et Hay, 1996; Berger, 2003 ; Bolia *et al.*, 2001 ; Brungart *et al.*, 2007 ; Borg *et al.*, 2008 ; Gallagher *et al.*, 2014; 2015a,b ; McKinley, 2000; Noble *et al.*, 1990; Simpson *et al.*, 2005 ; Takimoto *et al.*, 2007; Vaillancourt *et al.*, 2013 ; Vause et Grantham, 1999) et contribue à une augmentation du nombre de confusions avant/arrière comparativement à la condition sans protection (Abel et Hay, 1996; Alali et Casali, 2011 ; Gallagher *et al.*, 2014, 2015 ab ; Zimpfer et Sarafian, 2014 ; Brown *et al.*, 2015; Mlynski et Kozlowski, 2016 ; Scharine *et al.*, 2018 ; Vaillancourt *et al.*, 2019).

Le type de protecteur auditif a également une influence sur les performances, les protecteurs de type bouchon offrant une meilleure performance que les coquilles (Abel et Hay, 1996 ; Suter, 1989 ; Talcott *et al.*, 2012 ; Vaillancourt *et al.*, 2013 ; Scharine et Weatherless, 2014 ; Vaillancourt *et al.*, 2019). En général, les protecteurs électroniques actifs ou à rétablissement de son ne semblent pas améliorer la localisation sonore comparativement aux protecteurs passifs (Brungart *et al.*, 2007 ; Alali et Casali, 2011 ; Casali et Alali, 2010 ; Alali, 2011 ; Zimpfer et Sarafian, 2014 ; Brown *et al.*, 2015 ; Smalt *et al.*, 2019 ; Vaillancourt *et al.*, 2019). Même lorsqu'une amélioration est notée, les performances obtenues en mode de rétablissement de son demeurent inférieures à la condition sans protection auditive (Mlynski et Kozlowski, 2016). À l'aide de mesures objectives des fonctions de transfert directionnelles, certains auteurs (Brown *et al.*, 2015 ; Zimpfer et Sarafian, 2014 ; Joubaud *et al.*, 2015) expliquent les différences entre divers types de protecteurs auditifs par une moins grande perturbation des indices spectraux par les bouchons passifs que les bouchons actifs, alors que les coquilles semblent dégrader encore plus les indices spectraux. Finalement, un régime d'entraînement peut améliorer les capacités de localisation sonore sans protection auditive (Cave *et al.*, 2020) et avec des protecteurs auditifs électroniques, les performances avec ces derniers pouvant parfois atteindre des niveaux similaires à ceux sans protection auditive (Casali et Robinette, 2015 ; Lee et Casali, 2019).

Dans une étude, Vaillancourt *et al.* (2019) ont comparé les capacités de localisation sonore de l'alarme tonale et de l'alarme à large bande chez des participants avec une audition normale qui devaient réaliser une tâche tout en identifiant la provenance d'un signal d'alarme de courte durée émanant d'un haut-parleur faisant partie d'une sphère de huit haut-parleurs disposés sur 360 degrés. La courte durée du signal, soit un cycle complet de l'alarme (0,99 sec pour l'alarme tonale et 0,77 sec pour l'alarme à large bande), réduit l'utilité des mouvements de tête et du haut du corps dans une telle tâche. Chaque groupe de participants était évalué sans protection auditive et dans une des trois conditions de protection passive (bouchons EAR Ultrafit ; coquilles PELTOR Optime 95 ; double protection) ou avec l'un des trois protecteurs à rétablissement de son évalués

(bouchons 3M PELTOR Tactical ; coquilles 3M PELTOR Protac III ; ou coquilles Howard Leight IMPACT H). Dans la condition sans protection auditive, le pourcentage d'identification correcte de la source était approximativement le double pour l'alarme à large bande (environ 70 %) comparativement à l'alarme tonale (environ 35 %). Lors du port de protection auditive, la supériorité de l'alarme à large bande a été maintenue, sauf dans le cas de la double protection auditive, où les performances en localisation ont chuté à un niveau presque équivalent à celui de la chance pour les deux types d'alarmes. Les protecteurs auditifs ont nui à la localisation sonore, l'effet étant plus prononcé pour les coquilles que pour les bouchons. Les erreurs commises étaient plus fréquemment des confusions entre haut-parleurs adjacents et des confusions de type avant/arrière, les confusions de type gauche/droite étant plutôt rares (sauf dans le cas de la double protection). Finalement, les protecteurs auditifs à rétablissement de son n'ont généralement pas pu restaurer les performances en localisation sonore, du moins pas au niveau de performance obtenu sans protection auditive, les résultats étant souvent similaires ou pires que ceux obtenus lorsqu'utilisés en mode désactivé (donc comparable à une protection auditive passive).

Il semblerait également que l'orientation du travailleur par rapport au camion pourrait influencer la capacité à localiser correctement la source de danger. Mlynski et Kozlowski (2019) ont évalué la capacité de 50 individus avec audition normale à identifier correctement la direction de l'avertisseur sonore d'un camion en présence d'un bruit industriel lors du port de quatre différents protecteurs auditifs actifs (trois de type coquilles et un de type bouchon). Le système de localisation sonore comptait huit haut-parleurs séparés de 45 degrés, situés à une distance de 1,8 mètre du milieu de la tête. Des confusions avant/arrière fréquentes ont eu lieu pour un signal provenant directement de l'avant (0°) ou directement de l'arrière (180°), surtout avec les protecteurs de type coquilles. Le même constat a été fait pour un signal provenant de 45° et 315°, en plus des confusions avec des haut-parleurs adjacents. Une meilleure localisation du signal sonore a été notée pour un signal provenant de côté (90° et 270°). La localisation s'est avérée meilleure avec les protecteurs de type bouchon, le signal étant plus souvent jugé comme venant du haut-parleur ayant réellement émis le signal, ce qui n'était pas le cas avec les coquilles pour les sources à 45° et 315°. Les résultats ont également démontré que le mode actif n'améliorait pas les performances en localisation sonore comparativement au mode passif, entraînant parfois même des dégradations additionnelles de la performance. Ces résultats sont comparables à ceux d'autres études (Heckman *et al.*, 2011 ; Brown *et al.*, 2015 ; Mlynski et Kozlowski, 2017) qui ont démontré une meilleure localisation de la source sonore pour les positions latérales (90° et 270°) comparativement aux sources situées à 0° et 180°.

### 1.3.2 Effet de la protection auditive chez les individus avec perte auditive

Dans la plupart des études précitées, les participants étaient des individus avec une audition normale. La perte auditive peut toutefois avoir un impact négatif sur les capacités de localisation sonore (Zurek, 1986; Slattery and Middlebrooks, 1994; Noble *et al.* 1994 ; 1997 ; Lorenzi *et al.*, 1999 ; Hawley, 2000 ; Van Wanrooij and Van Opstal, 2004 ; Firszt *et al.*, 2015, 2017 ; Nelson *et al.*, 2018). Les différences interindividuelles sont importantes et les performances en localisation ne sont pas hautement corrélées avec l'audiogramme (Durlach *et al.*, 1981 ; Vaillancourt *et al.*, 2011) ou d'autres mesures d'audition binaurale (Hawley, 2000).

À notre connaissance, aucune étude n'a porté spécifiquement sur la localisation d'alarmes de recul par des individus avec une perte auditive lors du port de protecteurs auditifs. L'état des connaissances se limite donc à deux articles ayant exploré la capacité d'individus avec perte auditive à localiser des sources sonores lors du port de protecteurs auditifs.

Abel et Hay (1996) ont évalué l'effet de divers types de protecteurs (coquilles passives, bouchons passifs et coquilles offrant une certaine amplification) sur la capacité de 48 individus avec audition normale et 23 individus présentant une perte auditive neurosensorielle bilatérale sur les hautes fréquences à localiser des stimuli constitués de bruits d'une largeur d'un tiers d'octave centrés à 500 Hz ou à 4 000 Hz. Aucun mouvement de la tête n'était permis. À l'aide de six haut-parleurs (30 °, 90 °, 150 °, 210 °, 370 ° et 330 °), 16 conditions d'écoute ont été évaluées [quatre conditions de protection auditive (sans protection, bouchons passifs, coquilles passives, et coquilles avec amplification) x deux stimuli présentés à 80 dB SPL (500 Hz ou 4 000 Hz) x deux conditions d'ambiance sonore (silence et bruit blanc continu de 65 dB SPL)]. L'utilisation de protecteurs auditifs, particulièrement les coquilles avec amplification, a contribué à une détérioration des performances en augmentant le nombre de confusions de type gauche/droite pour le stimulus de hautes fréquences (indices des différences interaurales d'intensité), mais pas pour le stimulus de basses fréquences (indices des différences interaurales de temps), la performance étant bonne pour ce stimulus. La présence d'une perte auditive a contribué à augmenter le taux d'erreurs pour le stimulus de 4 000 Hz seulement. En ce qui concerne la discrimination avant/arrière, la performance du groupe avec perte auditive n'était pas plus élevée que le niveau de chance pour le stimulus de 500 Hz dans le silence et dans le bruit, ce qui était également le cas pour les auditeurs avec audition normale dans le bruit seulement. Avec le stimulus de 4 000 Hz, la performance était meilleure sans protecteurs auditifs, suivi des protecteurs de type bouchon, et pire avec les protecteurs de type coquilles chez les gens avec audition normale. Le type de protecteurs auditifs avait moins d'effet sur la performance des individus avec perte auditive.

Lors d'essais sur le terrain, Talcott *et al.* (2012) ont évalué la capacité de 9 individus avec audition normale et 4 individus avec perte auditive à localiser des coups de fusil émanant de 8 positions dans l'espace, disposées en un cercle d'un rayon d'environ 45 mètres autour de l'individu, chaque position étant séparée de la suivante de 45°. En plus des capacités de localisation sonore, le temps de réaction a été mesuré dans cinq conditions d'utilisation de protection auditive (oreilles nues, bouchons passifs à restauration de son, deux types de bouchons électroniques, et une coquille électronique) et ce, en présence de deux conditions de bruit (bruit de fond : 45-50 dBA ; bruit d'engin : 82 dBA). Pour la plupart des mesures de performance (déviations angulaires moyennes, pourcentage de réponses correctes, pourcentage de confusions avant/arrière, pourcentage de confusions gauche/droite), la localisation sonore s'est avérée meilleure dans la condition avec oreilles nues comparativement aux conditions avec protecteurs auditifs. Aucune différence significative n'a été notée entre les différents protecteurs de type bouchon. Par contre, les performances avec le protecteur de type coquilles étaient moins bonnes et le temps de réaction plus long, comparativement aux bouchons. Enfin, la présence d'une perte auditive a contribué à une augmentation du pourcentage de confusions gauche/droite, surtout avec les coquilles électroniques. Le faible nombre de participants limite la portée des conclusions qu'on peut tirer de cette étude.



## 2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

### 2.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'audibilité (seuils de détection et seuils de réaction) et la localisation sonore des deux grands types d'alarmes de recul (conventionnelle et large bande) utilisés au Québec, en présence d'une perte auditive jumelée ou non au port de protecteurs auditifs.

### 2.2 Objectifs spécifiques

L'atteinte de l'objectif principal passe par la poursuite des sous-objectifs suivants :

1. Évaluer, en laboratoire, le rapport signal/bruit permettant d'optimiser la détection et la réaction aux deux grands types d'alarmes utilisées sur le terrain en présence d'une perte auditive, jumelée ou non au port de protecteurs auditifs passifs ou à rétablissement de son (volet 1) ;
2. Évaluer en laboratoire la capacité des auditeurs avec perte auditive à localiser une alarme (tonale ou à large bande) tout en effectuant une autre tâche connexe lors du port ou non de protecteurs passifs ou à rétablissement de son (volet 2).

Avec ou sans protection auditive, la problématique de la perte auditive dans les milieux de travail où les travailleurs doivent entendre des alarmes de recul qui retentissent à plusieurs occasions et identifier leur provenance a été très peu abordée dans la littérature. Sur la base de l'état des connaissances, il est anticipé que :

- La perte auditive aurait un impact négatif sur les seuils de détection et les seuils de réaction, surtout lors du port de protection auditive ;
- L'effet du mode de rétablissement de son sur les seuils de détection serait plus important dans le silence que dans le bruit ;
- Les protecteurs à rétablissement de son ne permettront pas une restauration complète de l'audibilité des alarmes de recul, bien qu'ils présentent un certain avantage comparativement aux protecteurs utilisés en mode passif ;
- L'alarme à large bande demeurera plus facile à localiser que l'alarme tonale, même chez les individus avec perte auditive ;
- Les performances en localisation sonore varieront grandement d'un individu à l'autre chez les participants avec perte auditive, et elles seront généralement plus faibles que celles des individus avec audition normale ;
- Les coquilles à rétablissement de son nuiront davantage aux performances en localisation sonore des gens avec perte auditive que les bouchons à rétablissement de son, et que ces systèmes ne permettront pas une restauration des capacités de localisation sonore, du moins pas à des niveaux comparables aux résultats obtenus sans protection auditive.

Pour être déclarée un signal sonore avertisseur efficace, une alarme de recul doit non seulement être entendue et susciter une réaction chez le travailleur, mais ce dernier doit pouvoir également identifier sa provenance dans l'espace en se tournant vers le camion ou en se retirant de la zone de danger assez rapidement pour éviter un impact. Les prochaines sections abordent ces deux éléments cruciaux pour assurer la sécurité des travailleurs, qu'ils aient ou non une perte auditive et qu'ils portent ou non des protecteurs auditifs. Le volet 1 porte sur les essais réalisés pour évaluer les seuils de détection et de réaction, alors que le volet 2 est dédié aux essais réalisés pour évaluer la localisation sonore des alarmes de recul.

### **3. VOLET 1 – EFFET DE LA PERTE AUDITIVE ET DES PROTECTEURS AUDITIFS À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LES SEUILS DE DÉTECTION ET DE RÉACTION DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE**

#### **3.1 Méthodologie**

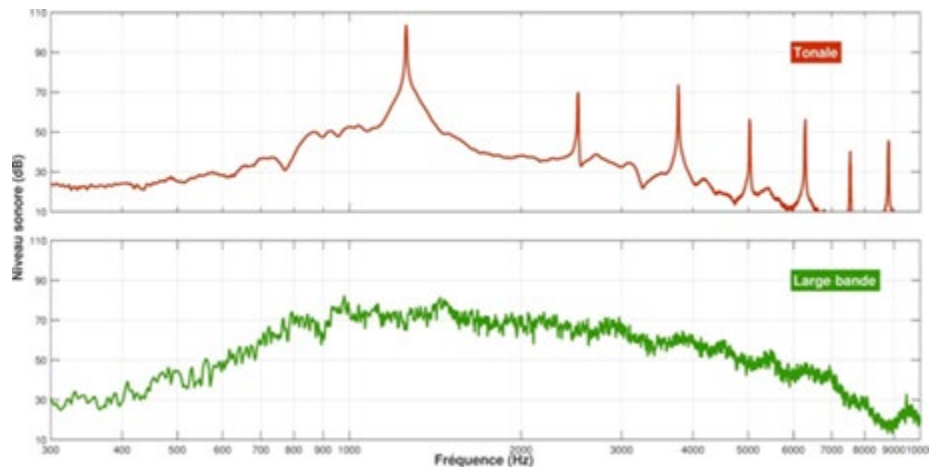
La méthodologie est similaire à celle employée dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2019) qui cherchait à évaluer l'effet de protecteurs auditifs passifs (coquilles 3M PELTOR Optime 95, bouchons E-A-R Ultrafit et double protection) et de protecteurs auditifs à rétablissement de son (coquilles 3M PELTOR Protac III, coquilles Howard Leight IMPACT H et bouchons 3M PELTOR Tactical) sur la perception et la localisation sonores des alarmes de recul chez des participants avec audition normale.

##### **3.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruit**

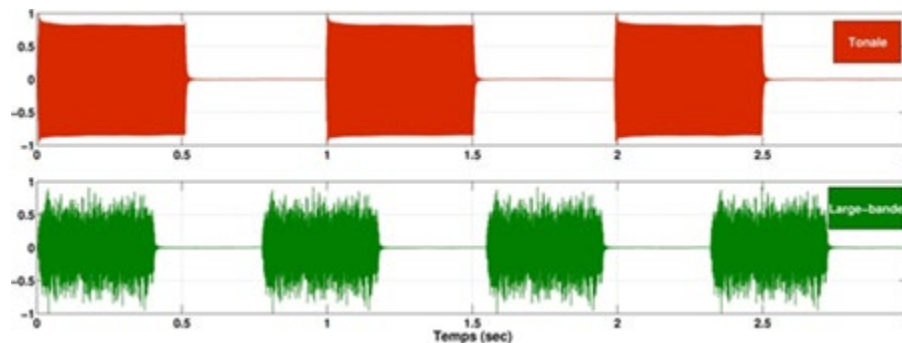
Deux alarmes de recul font l'objet de cette étude, soit l'alarme tonale (modèle 73030 de marque Grote) et l'alarme à large bande (BBS-107 Heavy Duty de Brigade Electronics). Leur contenu spectral est illustré à la figure 1 sur laquelle les niveaux de pression sonores (dB SPL), mesurés dans une chambre semi-anéchoïque à une distance approximative d'un mètre de l'alarme, sont représentés en fonction de la fréquence exprimée en bandes fines. L'alarme tonale se résume essentiellement en un son pur de 1 264 Hz accompagné d'harmoniques plus faibles en hautes fréquences. L'énergie acoustique produite par l'alarme à large bande est répartie sur un plus large spectre allant principalement de 700 à 4 000 Hz. Malgré l'absence d'un pic clairement défini, cette dernière alarme produit un niveau maximal entre 700 et 2 800 Hz, conformément à la norme SAE J994.

La figure 2 illustre la trace temporelle des deux alarmes. Le cycle de l'alarme est d'une durée de 990 ms pour [l'alarme tonale](#) (« bip » de 500 ms et pause de 490 ms) et de 770 ms pour [l'alarme à large bande](#) (« pschit » de 400 ms et pause de 370 ms).

**Figure 1. Contenu spectral de l'alarme tonale (GROTE 73030) et de l'alarme à large bande (BBS-107).**



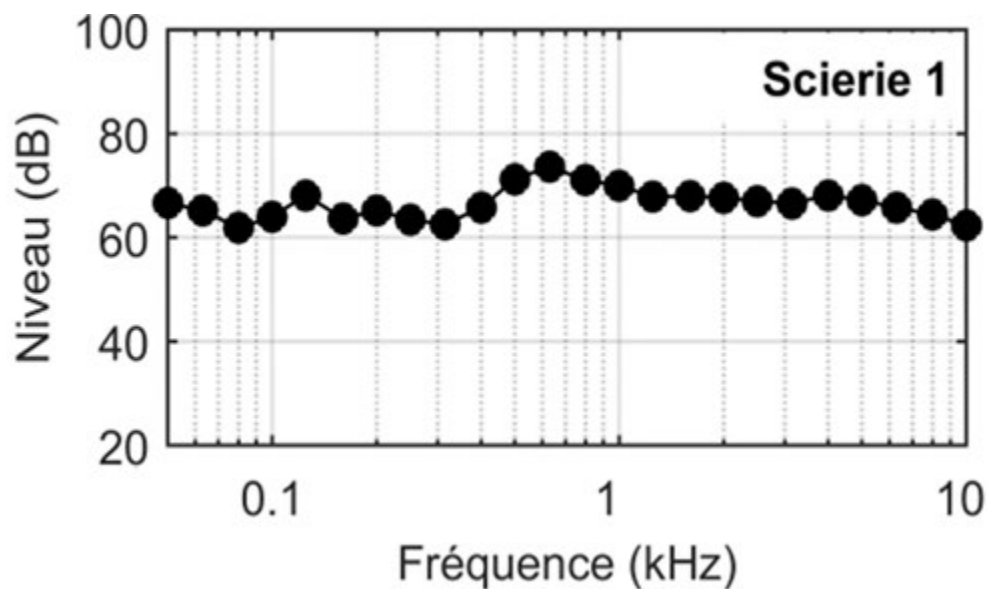
**Figure 2. Trace temporelle des deux alarmes de recul sur une durée de trois secondes.**



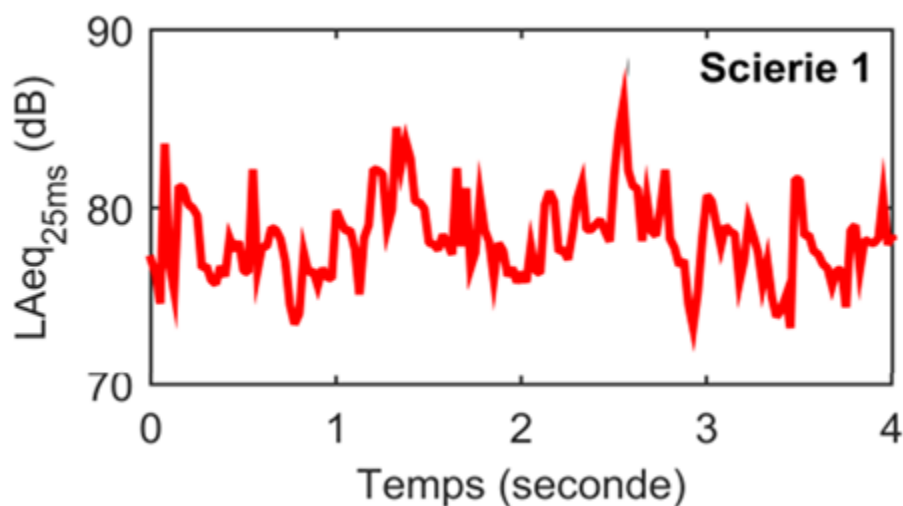
Dans le cadre des deux premières études (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017), un ensemble de douze bruits se distinguant par leurs caractéristiques spectrales et temporelles a été utilisé. Lors de la troisième étude (Vaillancourt *et al.*, 2019), le nombre de bruit a été réduit à six sur la base d'une redondance dans les caractéristiques spectrales et temporelles. Afin de cueillir des données dans un nombre plus élevé de conditions de protection auditive, tout en limitant le nombre total de conditions expérimentales et le nombre de participants à évaluer, un seul bruit a été retenu pour le présent projet. Les études antérieures ont démontré que les seuils de détection varient davantage en fonction du type de bruit que les seuils de réaction. Comme ce sont les seuils de réaction qui importent davantage pour assurer la sécurité des travailleurs, le fait de sélectionner un seul bruit ne devrait pas avoir un impact majeur sur les conclusions quant à l'ajustement du niveau sonore des alarmes.

En raison de la richesse de son contenu fréquentiel et temporel, le bruit retenu pour cette étude est issu du processus de production de copeaux de bois dans une usine. Ses caractéristiques spectrales et temporelles sont présentées, respectivement, à la figure 3 et figure 4. Pour toutes les mesures, le bruit a été présenté à un niveau de 80 dBA (niveau de bruit mesuré à 0,5 mètre du haut-parleur).

**Figure 3. Analyse spectrale en bandes de tiers d'octave du bruit de copeaux de bois (LZeq en fonction de la fréquence sur la durée totale du bruit).**



**Figure 4. Caractéristiques temporelles du bruit de copeaux de bois par segment de 25 ms (LAeq 25ms).**



### 3.1.2 Protecteurs auditifs

Les protecteurs auditifs à rétablissement de son sont destinés à améliorer l'intelligibilité de la parole et la perception auditive dans les milieux où des niveaux de bruit élevés alternent avec des périodes calmes. Un microphone capte le son à l'extérieur du protecteur, l'amplifie, puis le transmet dans le conduit auditif externe de façon à ce que, dans les milieux calmes, le son soit entendu à un niveau équivalent ou supérieur à celui obtenu sans protection auditive (CSA Z94.2-F14 R2019). En position OFF (système éteint), ces protecteurs sont considérés comme des protecteurs passifs.

Deux protecteurs auditifs à rétablissement de son ont été utilisés, soit les bouchons 3M PELTOR Tactical [Indice de réduction de bruit (IRB) en mode passif = 23 dB] et les coquilles Howard Leight IMPACT H (IRB en mode passif = 21 dB). L'amplification offerte par ces protecteurs auditifs aux différentes positions du contrôle de volume, mesurée à l'aide d'un mannequin acoustique (B&K Type 4128) et du bruit de copeaux de bois présenté à 60 dBA, est décrite dans l'étude précédente (Vaillancourt *et al.*, 2019).

Les bouchons 3M PELTOR Tactical offrent deux options pour le contrôle du volume, soit le volume maximal et le volume neutre, ajusté indépendamment pour l'oreille droite et l'oreille gauche. Les coquilles Howard Leight IMPACT H sont munies d'un unique contrôle continu du volume qui règle le volume des deux côtés simultanément. Pour ces deux types de protecteurs, toutes les mesures ont été effectuées en mode de rétablissement de son au volume maximal (MAX) et en mode passif, c'est-à-dire avec le système éteint (OFF).

### 3.1.3 Participants

Au total, 24 participants avec audition normale (19 femmes et 5 hommes) âgés entre 20 et 34 ans (moyenne = 23,8 ans ; écart-type = 3,8 ans) et 24 participants avec perte auditive (8 femmes et 15 hommes) âgés entre 22 et 71 ans (moyenne = 59,3 ans ; écart-type = 15,7 ans) ont participé aux épreuves de mesure des seuils de détection et de réaction des deux types d'alarmes de recul.

Les participants avec audition normale avaient des seuils de détection des sons purs en conduction aérienne égaux ou inférieurs à 25 dB HL (250 – 8 000 Hz), ainsi que des résultats normaux à la tympanométrie (compliance statique = 0,30 – 1,70 cm<sup>3</sup>; volume du conduit auditif externe = 0,9 – 2,0 cm<sup>3</sup>; gradient = 51 – 114 daPa ; pression = -150 à +50 daPa) (Martin et Clark, 2003). Les participants avec perte auditive devaient présenter un seuil d'audition de plus de 25 dB HL à au moins une fréquence, mais au moins deux seuils meilleurs que 60 dB HL à une oreille, pour éviter d'avoir des participants affichant une surdité bilatérale sévère à profonde. Une surdité sévère à profonde aux deux oreilles imposerait la génération de niveaux sonores des alarmes de recul qui dépasseraient 100 dBA ou les limites des équipements de laboratoire, particulièrement pour les seuils de retrait, et qui dépasseraient aussi les limites d'exposition sonore acceptables pour de

courtes durées. Aucun autre critère d'exclusion n'a été appliqué aux participants avec perte auditive, afin d'obtenir un échantillon de profils auditifs variés.

Avant de prendre part au projet de recherche, les participants devaient lire une lettre d'information, signer un formulaire de consentement et remplir un questionnaire d'histoire auditive. Le recrutement des participants et l'expérimentation ont été réalisés selon les politiques de déontologie en vigueur au Bureau d'éthique et d'intégrité de la recherche de l'Université d'Ottawa (certificat H08-18-963).

Dans une première étape, un otoscope Welch Allyn a été utilisé pour visualiser le conduit auditif alors qu'un tympanomètre GSI 38 a permis d'évaluer l'intégrité de l'oreille moyenne. Finalement, la mesure des seuils de détection des sons purs a été effectuée à l'aide d'un audiomètre Madsen Itera II de Otometrics.

### **3.1.4 Conditions expérimentales**

Les seuils de détection et les seuils de réaction ont été mesurés pour chacune des alarmes de recul (tonale et à large bande) dans 5 différentes conditions d'écoute : 1) NU (oreilles nues), 2) MOFF (coquilles éteintes, donc en mode passif), 3) MON (coquilles en mode de rétablissement de son au volume maximal), 4) POFF (bouchons éteints, donc en mode passif), et 5) PON (bouchons en mode de rétablissement de son au volume maximal). Un premier casque de sécurité était utilisé pour la condition oreilles nues et avec les bouchons, alors que les coquilles étaient montées sur un second casque identique. Chaque seuil a été mesuré deux fois dans une condition expérimentale donnée, et la valeur moyenne des deux présentations a été retenue comme seuil.

La mesure des seuils a été effectuée dans le silence et dans le bruit (bruit de copeaux de bois à 80 dBA) pour la détection sonore, et uniquement dans le bruit pour la réaction sonore. Au total, 40 seuils de détection [5 conditions d'écoute x 2 conditions de bruit (silence et bruit de copeaux de bois) x 2 alarmes x 2 répétitions de la mesure] et 20 seuils de réaction (5 conditions d'écoute x 2 alarmes x 2 répétitions de la mesure) ont été obtenus pour chaque participant.

### **3.1.5 Méthodes**

Dans une cabine d'écoute polyvalente (Eckel Industries) de 4,29 m x 3,65 m x 2,42 m (longueur/largeur/hauteur), un haut-parleur placé 0,5 m derrière le centre de la tête de l'individu assis servait à présenter les alarmes, alors que 4 haut-parleurs (situés dans chaque coin de la salle) et un caisson de basse diffusaient le bruit de fond (80 dBA). Le lecteur est référé au rapport de Vaillancourt *et al.* (2012 pour une description détaillée des équipements et de la cabine polyvalente.

Le seuil de détection réfère au plus faible niveau sonore de l'alarme nécessaire pour être tout juste audible dans le silence ou dans le bruit, alors que le seuil de réaction représente le niveau sonore de l'alarme qui est suffisamment fort pour inciter le travailleur à se

tourner vers le véhicule (réaction immédiate) ou à se déplacer hors de la zone de danger (retrait immédiat). Ces seuils sont exprimés en dBA dans le silence ou en un rapport signal-sur-bruit (S/B) dans le bruit, soit le niveau du signal relatif à celui du bruit (signal – bruit = rapport S/B). Pendant les mesures de seuil, les participants étaient encouragés à s’imaginer travailler dans le milieu de travail bruyant, en présence de véhicules lourds qui circulent autour d’eux.

Une tablette numérique dotée d’un logiciel conçu pour le projet a servi à ajuster, en utilisant des pas de 2 dB, le niveau sonore des alarmes lors de la mesure des seuils de détection et de réaction. Afin de familiariser les participants avec les stimuli utilisés, les deux alarmes et le bruit ont été présentés à un niveau de 80 dBA. Après une explication de la tâche, une pratique a été effectuée durant laquelle le seuil de détection de chaque alarme a été mesuré dans le silence, ensuite dans le bruit, pour terminer avec la mesure du seuil de réaction dans le bruit. Lors de cette pratique, une vérification de la compréhension des consignes a également eu lieu.

Les consignes détaillées sont présentées à l’annexe A. Pour le seuil de détection, les participants devaient diminuer le niveau de l’alarme pour atteindre un niveau infraliminaire (c’est-à-dire à un niveau où l’alarme n’était plus audible), pour ensuite augmenter graduellement son niveau jusqu’à ce qu’elle soit tout juste perceptible dans le silence ou dans le bruit. Les participants devaient répéter cette procédure d’ajustement à plusieurs reprises jusqu’à ce qu’ils soient certains que leur réponse représente le plus bas niveau sonore perceptible, dans une série ascendante. Il est à noter que les participants devaient enregistrer leur réponse lors d’une progression ascendante et non descendante comme prescrite dans la plupart des méthodes normalisées de recherche de seuils [p. ex., ANSI/ASA S3.21-2004 (R2019)]. Le niveau de présentation initial était de 60 dBA pour la condition de silence sans protection auditive et avec les protecteurs auditifs à rétablissement de son utilisés au volume maximal, et 80 dBA dans le silence avec les protecteurs auditifs à rétablissement de son éteints et pour toutes les mesures du seuil de détection dans le bruit.

Pour le seuil de réaction, le niveau de présentation initial était de 65 dBA dans toutes les conditions expérimentales. Les participants devaient ajuster l’alarme pour identifier le niveau sonore à partir duquel l’alarme évoquerait une sensation d’urgence suffisante qui, sur le terrain, se traduirait par une réaction de se tourner vers le camion ou de se déplacer hors de la trajectoire du camion qui s’approche (zone de danger).

Dans chaque condition d’écoute, la mesure des seuils de détection a précédé celle des seuils de réaction. En revanche, l’ordre de mesure des seuils de détection dans le silence et dans le bruit a été contrebalancé sur l’ensemble des participants, tout comme l’ordre de présentation de différentes conditions d’écoute. Par ailleurs, pour limiter l’insertion et le retrait multiples des protecteurs auditifs, ce qui pourrait modifier les caractéristiques d’atténuation d’un essai à l’autre, toutes les mesures avec un protecteur auditif donné se sont succédées avant de passer à l’autre protecteur auditif ou à la condition sans



protection auditive. Finalement, après les mesures avec chaque type de protecteurs auditifs, une mesure du seuil de détection dans le silence a eu lieu pour chaque type d'alarme afin de vérifier qu'une atténuation adéquate a été obtenue, en comparant le seuil mesuré avec celui obtenu dans le silence lors de la pratique. Dans les cas où une atténuation insuffisante était notée, le protecteur auditif était remplacé ou un bouchon de grosseur différente était utilisé.

## 3.2 Résultats

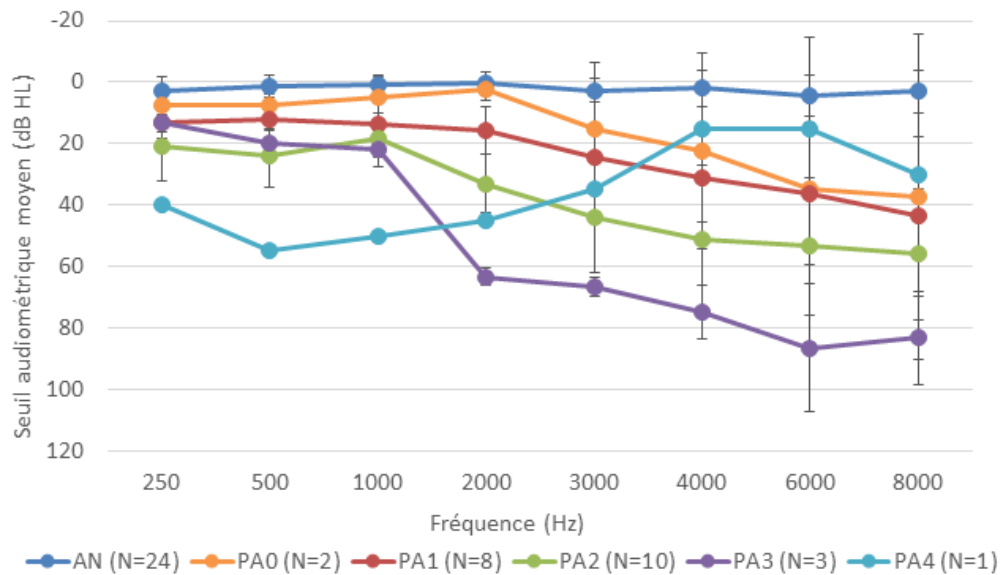
### 3.2.1 Statut auditif des participants

Puisque la détection sonore dépend principalement de la meilleure oreille, les participants sont catégorisés sur la base de la moyenne des sons purs (MSP) à 500, 1 000 et 2 000 Hz à la meilleure oreille, dans les catégories suivantes :

- AN :  $MSP \leq 10$  dB HL avec seuils audiométriques  $\leq 25$  dB HL à toutes les fréquences, aux deux oreilles (N = 24)
- PA0 :  $MSP \leq 10$  dB HL mais avec perte auditive (N = 2 ; un individu avec perte auditive asymétrique sur les hautes fréquences et un individu avec une perte unilatérale)
- PA1 :  $10$  dB HL <  $MSP \leq 20$  dB HL (N = 8)
- PA2 :  $20$  dB HL <  $MSP \leq 30$  dB HL (N = 10)
- PA3 :  $30$  dB HL <  $MSP \leq 40$  dB HL (N = 3)
- PA4 :  $MSP > 40$  dB HL (N = 1)

Cette classification s'inspire de celle de *Arz et al.* (2021). Elle est utilisée afin de mieux décrire la variété du degré des pertes auditives dans notre échantillon. La courbe moyenne des seuils audiométriques de la meilleure oreille pour chacune des catégories est illustrée à la figure 5.

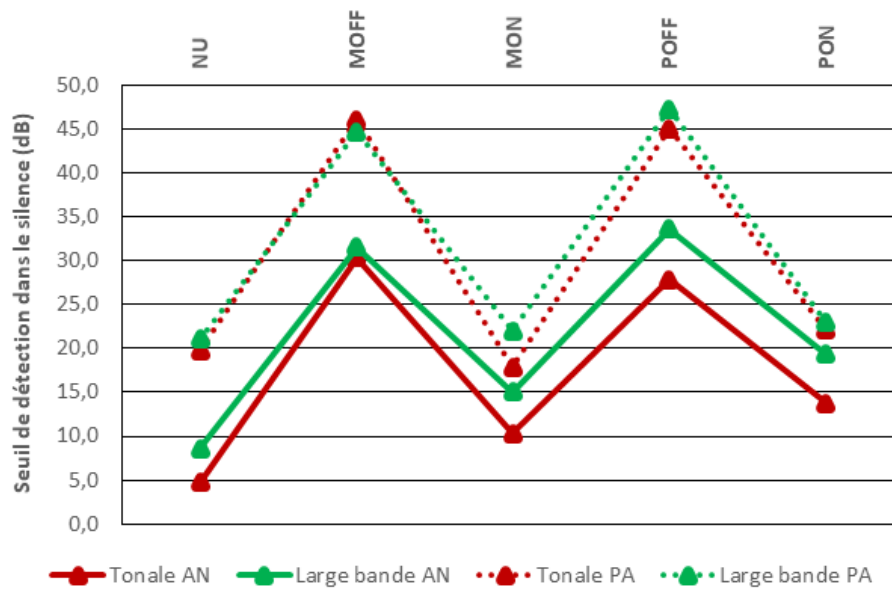
**Figure 5. Seuils audiométriques moyens à la meilleure oreille en fonction de la fréquence pour chacune des catégories de statut auditif (AN = auditeurs normaux ; PA = auditeurs avec perte auditive).**



### 3.2.2 Données descriptives

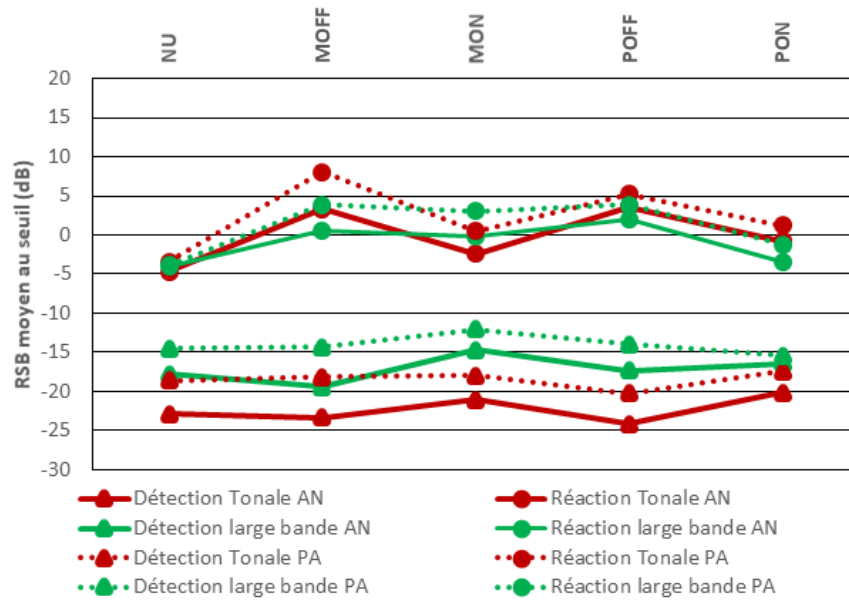
Les seuils moyens de détection dans le silence pour les deux types d’alarmes de recul sont illustrés à la figure 6 pour les auditeurs normaux (AN) et les individus avec perte auditive (PA). L’atténuation offerte par le mode passif des deux protecteurs auditifs est similaire pour les deux types d’alarmes et pour les deux groupes d’individus, atteignant des valeurs moyennes d’environ 23-26 dB. Le mode de rétablissement de sonore offre un avantage considérable en améliorant le seuil de détection dans le silence comparativement au mode éteint d’environ 16 dB chez les auditeurs normaux et d’environ 25 dB chez les gens avec perte auditive (sur l’ensemble des alarmes et des deux types de protecteurs). Il est intéressant de noter que le mode de rétablissement de son semble ramener le seuil dans le silence à un niveau similaire à celui sans protection auditive, du moins dans le groupe avec perte auditive. Dans le groupe avec audition normale, le seuil dans le silence demeure plus faible sans protection auditive qu’avec les protecteurs utilisés en mode de rétablissement de son, d’environ 8 dB. Un tel résultat pourrait être expliqué par l’interférence du bruit interne généré par le protecteur lors de la mise en marche des fonctions électroniques.

**Figure 6. Seuils de détection dans le silence par condition d'écoute et type d'alarme de recul pour les deux groupes de participants (AN : Auditeurs normaux, PA : Individus avec perte auditive).**

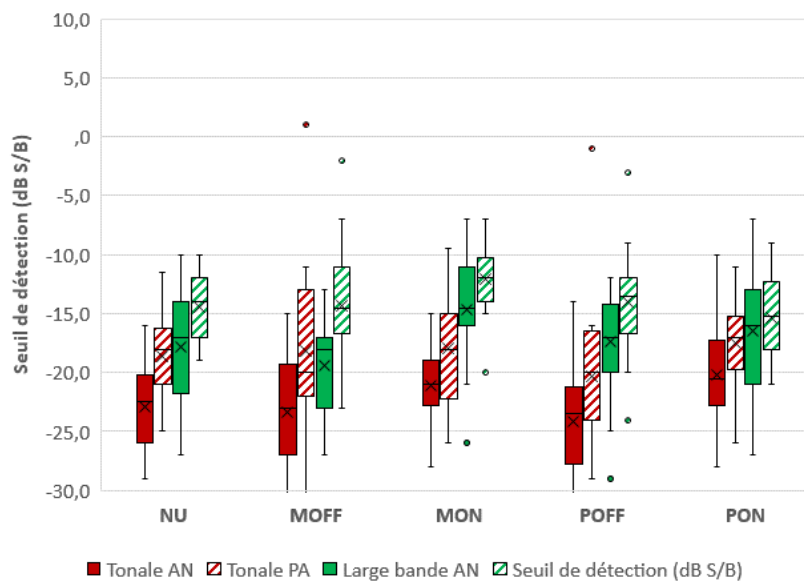


Les seuils moyens de détection et de réaction dans le bruit pour les deux types d'alarmes de recul sont exprimés en rapport signal-sur-bruit (RSB) à la figure 7 pour les auditeurs normaux (AN) et pour le groupe d'individus ayant une perte auditive (PA). Un diagramme de type « *Box & Whiskers* » (boîtes à moustache) (figure 8 pour les seuils de détection et figure 9 pour les seuils de réaction) permet de visualiser les données dans un autre format afin de mettre en évidence la dispersion des données. Sur ces figures, les limites inférieures et supérieures de la boîte représentent le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>e</sup> quartile. La barre du milieu représente la médiane, le x, la moyenne. Les moustaches représentent les valeurs minimales et maximales, excluant les données aberrantes.

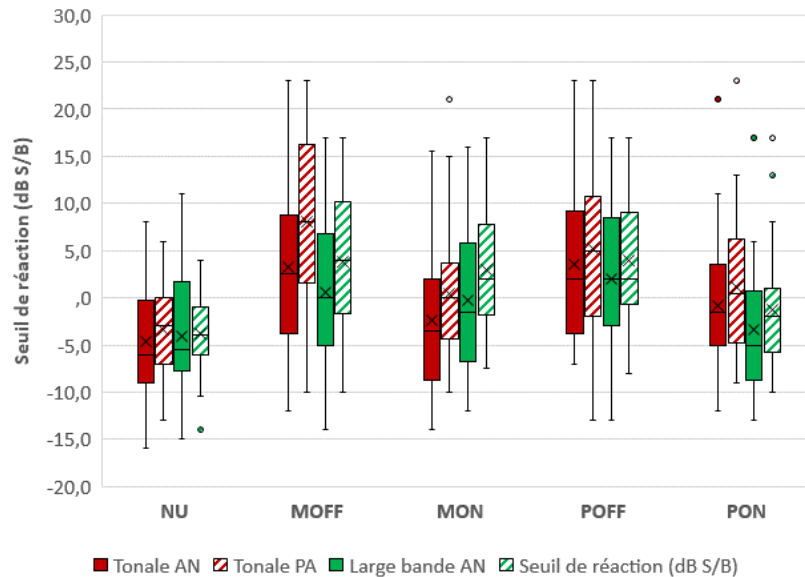
**Figure 7. Seuils de détection et de réaction dans le bruit par condition d'écoute et type d'alarme de recul pour les deux groupes de participants (AN : Auditeurs normaux, PA : Individus avec perte auditive).**



**Figure 8. Diagramme « Box & Whiskers » par condition d'écoute et type d'alarme de recul pour les seuils de détection dans le bruit pour les deux groupes de participants. NU = sans protection auditive, MOFF = coquilles en mode passif, MON = coquilles en mode de rétablissement de son, POFF = bouchons en mode passif, et PON = bouchons en mode de rétablissement de son.**



**Figure 9. Diagramme « Box & Whiskers » par condition d'écoute et type d'alarme de recul pour les seuils de réaction dans le bruit pour les deux groupes de participants. NU = sans protection auditive, MOFF = coquilles en mode passif, MON = coquilles en mode de rétablissement de son, POFF = bouchons en mode passif, et PON = bouchons en mode de rétablissement de son.**



Chez les participants avec audition normale, le seuil de détection moyen varie sur l'ensemble des conditions d'écoute de -24,2 dB S/B à -20,2 dB S/B pour l'alarme tonale, et de -19,4 dB S/B à -14,7 dB S/B pour l'alarme à large bande. Le seuil de réaction moyen s'étend de -4,7 dB S/B à 3,6 dB S/B pour l'alarme tonale, et de -4,1 dB S/B à 2,0 dB S/B pour l'alarme à large bande. Il est à noter que les seuils de détection sont moins variables (écarts-types : de 3,0 à 5,1 dB pour l'alarme tonale et de 4,2 à 4,9 dB pour l'alarme à large bande, sur l'ensemble des conditions) que les seuils de réaction (écarts-types : de 6,4 dB à 9,3 dB pour l'alarme tonale et de 6,3 dB à 8,6 dB pour l'alarme à large bande, sur l'ensemble des conditions).

Chez les participants avec une perte auditive, le seuil de détection moyen varie sur l'ensemble des conditions d'écoute de -20,3 dB S/B à -17,5 dB S/B pour l'alarme tonale, et de -15,4 dB S/B à -12,0 dB S/B pour l'alarme à large bande. Le seuil de réaction moyen s'étend de -3,4 dB S/B à 8,0 dB S/B pour l'alarme tonale, et de -3,8 dB S/B à 3,5 dB S/B pour l'alarme à large bande. Tout comme pour les auditeurs normaux, la variabilité des seuils de détection est plus restreinte (écarts-types : de 3,5 à 6,8 dB pour l'alarme tonale et de 2,8 à 4,9 dB pour l'alarme à large bande, sur l'ensemble des conditions) que celle associée aux seuils de réaction (écarts-types : de 5,1 dB à 9,5 dB pour l'alarme tonale et de 4,1 dB à 7,6 dB pour l'alarme à large bande, sur l'ensemble des conditions).

En général, il appert que les seuils de détection sont plus élevés pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale alors que les seuils de réaction sont relativement semblables pour les deux types d'alarmes. Finalement, la perte auditive contribue à une élévation des seuils de détection et des seuils de réaction. Par ailleurs, les protecteurs auditifs à rétablissement de son ne semblent pas toujours ramener les seuils de détection et les seuils de réaction à des niveaux similaires à ceux obtenus dans la condition sans protection auditive. Afin de valider certaines de ces observations, des analyses statistiques ont été effectuées.

### 3.2.3 Analyses statistiques

#### 3.2.3.1 Seuils de détection

Le plan d'expérience consiste en une analyse à 3 facteurs (type d'alarme, condition d'écoute et statut auditif) avec mesures répétées sur deux facteurs croisés. Le facteur intersujet qui définit le nombre de groupes expérimentaux est une variable catégorique à 2 niveaux (AN : audition normale ; PA : perte auditive). Les facteurs intrasujets qui définissent le nombre d'observations par participant sont la Condition d'écoute (5 niveaux : NU, MOFF, MON, POFF, PON) et le Type d'alarme (2 niveaux : tonale et large bande). La variable dépendante est le seuil de détection moyen sur deux essais. Un *alpha* de 0,05 est retenu pour déterminer le niveau de signification lors des analyses statistiques.

Pour les effets ayant plus qu'un degré de liberté, le test de Mauchly indique des preuves significatives contre la sphéricité pour l'effet principal du facteur Condition d'écoute ( $W = 0,4169$ ;  $p < 0,0001$ ), ainsi que pour les interactions Groupe x Condition d'écoute ( $W = 0,4169$ ;  $p < 0,0001$ ), Type d'alarme x Condition d'écoute ( $W = 0,5361$ ;  $p = 0,0001$ ), et Groupe x Condition d'écoute x Protection ( $W = 0,5361$ ;  $p = 0,0001$ ). Une correction de Huynh-Feldt (Baguley, 2012) pour la non-sphéricité est donc appliquée dans l'analyse subséquence de la signification de ces effets.

Le tableau 1 résume les résultats d'une ANOVA à mesures répétées visant à tester la signification des effets. L'*éta* carré partiel généralisé ( $\eta^2_{pG}$ ) (Bakeman, 2005) sert à quantifier l'importance des effets alors que les conventions de Cohen (1989) sont utilisées pour qualifier la grandeur de l'effet (petit :  $\eta^2 = 0,01$  ; moyen :  $\eta^2 = 0,06$  ; grand :  $\eta^2 = 0,14$ ). On y note que l'effet principal le plus important est celui du facteur Type d'alarme, suivi des facteurs Groupe et Condition d'écoute. L'effet des interactions de deuxième et de troisième ordre est en général très petit à petit.

**Tableau 1. Résultats de l'ANOVA pour les seuils de détection et description de la grandeur de l'effet.**

Effets		Statistique (* = significatif)	$\eta^2_{pG}$	Grandeur de l'effet
Principaux	Condition d'écoute	$F(3,167, 145,686) = 10,504$ ; $p < 0,0001^*$	0,028	Moyennement petit
	Type d'alarme	$F(1, 46) = 226,486$ ; $p < 0,0001^*$	0,223	Grand
	Groupe	$F(1, 46) = 9,848$ ; $p = 0,0030^*$	0,090	Moyennement grand
Interactions	Condition d'écoute x Type d'alarme	$F(3,455, 158,925) = 7,668$ ; $p < 0,0001^*$	0,008	Très petit
	Condition d'écoute x Groupe	$F(3,167, 145,686) = 5,083$ ; $p = 0,0019^*$	0,013	Petit
	Type d'alarme x Groupe	$F(1, 46) = 0,030$ ; $p = 0,863$	0,00003	-
	Condition d'écoute x Type d'alarme x Groupe	$F(3,455, 158,925) = 3,090$ ; $p = 0,0230^*$	0,003	Très petit

### **Facteur Type d'alarme**

Selon le tableau 1, l'effet principal du facteur Type d'alarme est grand, mais les interactions entre le facteur Type d'alarme et les autres facteurs ne sont pas significatives ou les effets sont très petits. Ainsi, seulement l'effet principal du facteur Type d'alarme est examiné à l'aide d'une comparaison deux à deux. En moyennant sur les niveaux des facteurs Condition d'écoute et Groupe, on note une différence significative [ $t(46) = 15,049$  ;  $p < 0,0001$ ) entre l'alarme tonale et l'alarme à large bande, le seuil de détection moyen de l'alarme tonale étant 5,2 dB plus faible que celui de l'alarme à large bande.

### **Facteur Condition d'écoute**

Pour décrire les effets simples du facteur Condition d'écoute, la méthode Bonferroni-Holm (Maxwell, 1980) est utilisée pour les comparaisons deux à deux au sein de chaque Groupe (AN et PA) en moyennant sur les niveaux du facteur Type d'alarme.

Dans le groupe avec audition normale, 6 des 10 comparaisons possibles sont significatives. Les seuils de détection dans la condition oreille nue ne sont pas significativement différents de ceux mesurés avec les deux types de protecteurs auditifs en mode éteint. Le type de protecteur auditif ne semble également pas avoir d'effet sur le seuil de détection des alarmes, tant en mode éteint qu'en mode de rétablissement de son. Les différences significatives peuvent être résumées comme suit : les seuils de détection sont plus faibles (meilleurs) dans la condition oreille nue (NU) qu'avec les protecteurs auditifs en mode de rétablissement de son (par 2,5 dB avec MON et 2,0 dB avec PON), et

quand les protecteurs auditifs sont utilisés en mode éteint comparativement en mode de rétablissement de son [par une valeur entre 2,4 dB (POFF vs PON) et 3,5 dB (MOFF vs MON)].

Dans le groupe avec perte auditive, 2 des 10 comparaisons possibles sont significatives dans le groupe avec audition normale. L'utilisation de coquilles en mode de rétablissement sonore (MON) résulte en des seuils de détection plus élevés par 2,2 dB que lors de l'utilisation des bouchons en mode éteint et en mode de rétablissement de son.

### **Facteur Groupe**

Pour décrire les effets simples du facteur Groupe, un test t est utilisé pour comparer les deux niveaux au sein de chaque condition d'écoute (NU, MOFF, MON, POFF, PON) en moyennant sur les niveaux du facteur Type d'alarme. Les seuils de détection des alarmes sont plus faibles dans le groupe avec audition normale que dans le groupe avec perte auditive (par 3,8 dB pour NU, par 5,1 dB pour MOFF, par 2,9 dB pour MON et par 3,6 dB pour POFF), à l'exception de la condition d'utilisation des bouchons en mode de rétablissement sonore (PON) où la différence de 1,9 dB n'a pas atteint le niveau de signification.

La relation entre la MSP (500, 1 000, 2 000 Hz) de la meilleure oreille et le seuil de détection moyenné sur les deux types d'alarmes peut être quantifiée à l'aide d'analyses corrélationnelles. On note une pente positive (élévation du seuil en dB pour chaque augmentation de 1 dB de la MSP) pour chacune des conditions d'écoute, indiquant une élévation du seuil de détection avec le degré de perte auditive à ces fréquences.

La corrélation est faible, mais significative dans toutes les conditions [NU : pente = 0,14 ;  $r^2 = 0,2262$ ;  $p = 0,0006$ ; MOFF : pente = 0,22 ;  $r^2 = 0,2676$ ;  $p = 0,0002$ ;

MON : pente = 0,11 ;  $r^2 = 0,1552$ ;  $p = 0,0056$ ; POFF : pente = 0,18 ;  $r^2 = 0,2425$ ;  $p = 0,0004$ ] à l'exception de PON (pente = 0,08;  $r^2 = 0,0731$ ;  $p = 0,06$ ).

#### **3.2.3.2 Seuils de réaction**

Le plan d'expérience est identique à celui pour les seuils de détection (3 facteurs avec mesures répétées sur deux facteurs croisés), alors que la variable dépendante est le seuil de réaction moyen sur deux essais. Un alpha de 0,05 est retenu pour déterminer le niveau de signification lors des analyses statistiques.

Pour les effets ayant plus qu'un degré de liberté, le test de Mauchly indique des preuves significatives contre la sphéricité pour l'effet principal du facteur Condition d'écoute ( $W = 0,6205$ ;  $p = 0,0119$ ), ainsi que pour l'interaction Groupe x Condition d'écoute ( $W = 0,6205$ ;  $p = 0,0119$ ). Une correction de Huynh-Feldt (Baguley, 2012) pour la non-sphéricité est donc appliquée dans l'analyse subséquence de la signification de ces effets. Les preuves contre la sphéricité ne sont pas significatives pour les interactions



Type d'alarme/Condition d'écoute ( $W = 0,7702$ ;  $p = 0,237$ ) et Groupe/Type d'alarme/Condition d'écoute ( $W = 0,7702$ ;  $p = 0,237$ ).

Le tableau 2 résume les résultats d'une ANOVA à mesures répétées visant à tester la signification des effets. On y retrouve également l'êta carré partiel généralisé ( $\eta^2_{pG}$ ) pour quantifier l'importance des effets selon les conventions de Cohen pour qualifier la grandeur de l'effet (petit :  $\eta^2 = 0,01$  ; moyen :  $\eta^2 = 0,06$  ; grand :  $\eta^2 = 0,14$ ). On y note que l'effet principal le plus important est celui du facteur Condition d'écoute, alors que celui du facteur Type d'alarme est très petit et celui du facteur Groupe est petit. L'effet des interactions de deuxième et de troisième ordre est en général de très petit à petit.

**Tableau 2. Résultats de l'ANOVA pour les seuils de réaction et description de la grandeur de l'effet.**

Effets		Statistique (* = significatif)	$\eta^2_{pG}$	Grandeur de l'effet
Principaux	Condition d'écoute	$F(3,522, 162,019) = 55,5788$ ; $p < 0,0001^*$	0,132	Moyennement grand
	Type d'alarme	$F(1, 46) = 9,906$ ; $p = 0,0029^*$	0,004	Très petit
	Groupe	$F(1, 46) = 1,388$ ; $p = 0,2469$	0,020	-
Interactions	Condition d'écoute x Type d'alarme	$F(4, 184) = 33,606$ ; $p < 0,0001^*$	0,016	Petit
	Condition d'écoute x Groupe	$F(3,522, 162,019) = 1,8949$ ; $p = 0,122$	0,005	-
	Type d'alarme x Groupe	$F(1, 46) = 0,3085$ ; $p = 0,5813$	0,0001	-
	Condition d'écoute x Type d'alarme x Groupe	$F(4, 184) = 1,122$ ; $p = 0,3476$	0,0005	-

### Facteur Type d'alarme

Pour décrire les effets simples du facteur Type d'alarme, la méthode Bonferroni-Holm est utilisée pour les comparaisons deux à deux au sein de chaque niveau du facteur Condition d'écoute en moyennant sur les niveaux du facteur Groupe. Les seuils de réaction sont plus faibles pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale, par 3,4 dB pour MOFF, par 1,5 dB pour POFF, et par 2,5 dB pour PON. Un léger avantage (2,4 dB) pour l'alarme tonale est noté dans la condition MON, alors que la différence entre les deux alarmes est négligeable et non statistiquement significative dans la condition NU.

## **Facteur Condition d'écoute**

Pour décrire les effets simples du facteur Condition d'écoute, la méthode Bonferroni-Holm (Maxwell, 1980) est utilisée pour les comparaisons deux à deux au sein de chaque niveau du facteur Type d'alarme en moyennant sur les niveaux du facteur Groupe. Un niveau de signification de 0,05.

Pour l'alarme à large bande, 6 des 10 comparaisons possibles sont significatives. En général, les seuils de réaction sont plus faibles (meilleurs) dans la condition sans protection auditive que dans les autres conditions d'écoute (par 6,2 dB pour MOFF, par 5,4 dB pour MON, par 6,9 dB pour POFF), sauf pour la condition PON où la différence est faible (1,6 dB) et n'atteint pas le degré de signification. Les autres différences significatives impliquent les bouchons en mode de rétablissement sonore (PON). Dans ce mode d'opération des bouchons, les seuils de réaction sont plus faibles que POFF (par 5,3 dB), que MOFF (par 4,5 dB) et que MON (par 3,7 dB).

Pour l'alarme tonale, l'effet de la condition d'écoute semble plus important. Pour cette alarme, 8 des 10 comparaisons possibles sont significatives. On note que les seuils de réaction demeurent plus faibles (meilleurs) dans la condition NU comparativement aux protecteurs en mode de rétablissement de son (par 3,1 dB pour MON et par 4,3 dB pour PON) et lorsque les protecteurs auditifs sont éteints (par 9,7 dB pour MOFF et par 8,5 dB pour POFF). Le mode de rétablissement sonore améliore les seuils de réaction comparativement au mode éteint (par 6,6 dB pour MON vs MOFF, par 5,5 dB pour PON vs MOFF, par 4,2 dB pour PON vs POFF et par 5,4 dB pour MON vs POFF). Finalement, pour l'alarme tonale, le type de protecteur auditif ne semble avoir une grande influence sur le seuil de réaction, le seuil n'étant pas statistiquement différent entre les deux types de protecteurs, lorsqu'utilisés en mode éteint et en mode de rétablissement de son.

Il est intéressant de noter que pour la mesure des seuils de réaction, la Condition d'écoute a des effets plus importants que le Type d'alarme, alors que l'inverse semble être le cas pour les seuils de détection.

## **Facteur Groupe**

Alors que la perte auditive a un effet moyen sur les seuils de détection, l'effet du statut auditif (Groupe) n'est pas significatif sur les seuils de réaction.

## 4. VOLET 2 – EFFET DE LA PERTE AUDITIVE ET DES PROTECTEURS AUDITIFS À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LA LOCALISATION AUDITIVE DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE

### 4.1 Méthodologie

La méthodologie est presque identique à celle utilisée dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2019) pour la mesure des performances en localisation sonore chez des individus avec audition normale portant un casque de sécurité et des protecteurs auditifs (passifs et à rétablissement de son). La principale différence méthodologique porte sur la durée du signal d'alarme utilisé. Dans l'étude de Vaillancourt *et al.*, (2019), des pourcentages de réussite moyens (niveau de chance = 12,5 %) de seulement 70 % pour l'alarme à large bande et 35 % pour l'alarme tonale avaient été obtenus chez des individus avec audition normale sans protection auditive, pour un signal de courte durée (< 1sec.).

Lors des mouvements de la tête, les indices utilisés pour la localisation sonore [indices binauraux : différences interaurales de temps (DIT) et différences interaurales d'intensité (DII) et indices spectraux] changent avec la position de la tête relative à la source sonore. Cette variation dynamique des indices, possible en présence d'un signal long et des mouvements de la tête, contribue à améliorer les performances (Noble, 1981 ; Brungart *et al.*, 2007 ; Gallagher *et al.*, 2014, 2015ab ; Nélisse *et al.*, 2017).

Puisque de moins bonnes performances sont attendues chez des individus présentant une perte auditive, surtout avec protection auditive, un signal plus long (2,9 sec.) a été privilégié dans cette étude. Il est anticipé qu'un tel signal contribuera à améliorer les performances en localisation sonore, grâce aux mouvements de la tête et du haut du corps, permettant ainsi d'éviter les effets planchers (c.-à-d. des résultats trop près du niveau de chance), et du même coup une meilleure comparaison entre les diverses conditions d'écoute.

#### 4.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruit

L'alarme tonale et l'alarme à large bande, décrites à la sous-section 3.1.1, ont été présentées aléatoirement 2 à 8 secondes après l'introduction du bruit de fond (bruit de copeaux de bois dans une scierie de 80 dBA décrit aussi à la sous-section 3.1.1), à un rapport S/B de 0 dB dans la portion « on » de l'alarme, soit la portion durant laquelle un signal est émis. Chaque alarme avait une durée de 2,9 secondes, permettant ainsi de présenter trois cycles complets de l'alarme tonale (cycle = 0,990 s), comparativement à quatre cycles complets de l'alarme à large bande (cycle = 0,770 s).

#### 4.1.2 Participants

Vingt-huit individus (15 femmes et 13 hommes) âgés de 22 à 60 ans (moyenne = 25,2 ans ; écart-type = 7,1 ans) avec audition normale ont participé aux mesures de laboratoire sur la localisation des alarmes de recul. Ces participants respectaient les critères de sélection suivants : 1) sensibilité auditive normale dans les deux oreilles, telle que définie par des seuils de détection de sons purs en conduction aérienne égaux ou inférieurs à 25 dB HL (250 – 8000 Hz), 2) tympanogrammes normaux (compliance statique = 0,30 – 1,70 cm<sup>3</sup>; volume du conduit auditif externe = 0,9 – 2,0 cm<sup>3</sup>; gradient = 51 – 114 daPa; pression = -150 à +50 daPa) (Martin et Clark, 2003).

Un second groupe de trente-six individus (15 femmes et 21 hommes) âgés de 22 à 69 ans (moyenne = 54,2 ans ; écart-type = 14,2 ans) présentant une perte auditive a pris part à cette étape. Certains des individus ont également participé aux mesures des seuils de détection et de réaction. Les participants devaient présenter un seuil d'audition de plus de 25 dB HL à au moins une fréquence, mais au moins deux seuils meilleurs que 60 dB HL, afin d'éviter la présence d'une surdité sévère à profonde.

Avant de prendre part au projet de recherche, les participants devaient lire une lettre d'information, signer un formulaire de consentement, et remplir un questionnaire d'histoire auditive. Le recrutement des participants et l'expérimentation ont été réalisés selon les politiques de déontologie en vigueur au Bureau d'éthique et d'intégrité de la recherche de l'Université d'Ottawa (certificat H08-18-963). Par la suite, l'évaluation audiométrique de base (otoscopie, tympanométrie et mesure des seuils auditifs) a été effectuée, avec l'équipement décrit à la section 3.1.3.

#### 4.1.3 Conditions expérimentales

Les protecteurs auditifs à rétablissement de son décrits à la sous-section 3.1.2 (bouchons 3M PELTOR Tactical et coquilles Howard Leight IMPACT H) ont été utilisés pour les mesures de localisation sonore des deux alarmes de recul (tonale et à large bande) dans 5 différentes conditions d'écoute : 1) oreilles nues (casque seulement), 2) coquilles en mode passif (coquilles OFF), 3) coquilles en mode de rétablissement de son au volume maximal (coquilles MAX), 4) bouchons en mode passif (bouchons OFF) et 5) bouchons en mode de rétablissement de son au volume maximal (bouchons MAX). Dans toutes les conditions, les participants devaient également porter un casque de sécurité. Un premier casque de sécurité était utilisé pour la condition oreilles nues et avec les bouchons, alors que les coquilles étaient montées sur un second casque identique.

La performance en localisation sonore a été mesurée dans 10 conditions expérimentales (5 conditions d'écoute x 2 alarmes), en présence du bruit de copeaux de bois (80 dBA). Dans chaque condition, l'alarme sélectionnée a été présentée 36 fois, de manière aléatoire par les 8 haut-parleurs.

#### 4.1.4 Méthodes

Dans la même cabine d'écoute polyvalente (Eckel Industries) décrite à la sous-section 3.1.5 et dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2012), 8 haut-parleurs, espacés uniformément sur un cercle de 360 degrés (voir figure 10) d'un rayon d'un mètre, servaient à présenter les alarmes de recul. Le bruit de fond émanait simultanément de l'ensemble des 8 haut-parleurs, en plus d'un 9<sup>e</sup> haut-parleur fixé au plafond au-dessus de la tête des participants, à un niveau global de 80 dBA. Un ordinateur portable générait les signaux (alarmes et bruit) à l'aide d'une interface développée sous LabView par l'équipe de recherche. Le système était connecté à une carte d'acquisition de données *National Instruments* et à un amplificateur relié aux haut-parleurs.

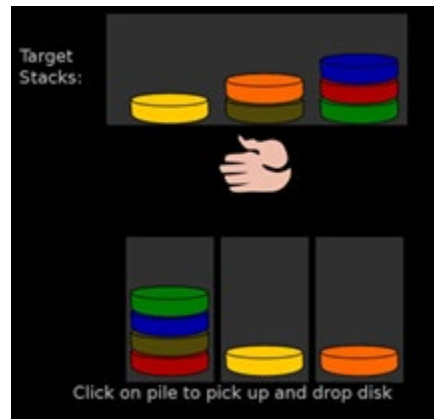
Les participants devaient se tenir debout, les pieds fixes au sol, au milieu du cercle de localisation (figure 10). Après chaque présentation d'une alarme de recul, soit 2 à 8 secondes après l'introduction du bruit de fond, les participants devaient identifier le numéro du haut-parleur ayant émis le signal. Une tablette numérique fixée à un trépied se trouvait devant eux et servait à administrer la tâche connexe, le *Tower of London Test*. Ce test fait partie de la série de tests du logiciel EBL *Psychological Test Battery*, disponible en ligne gratuitement (<http://pebl.sourceforge.net/battery.html>) et consiste à manipuler des disques de différentes couleurs afin de reproduire un patron quelconque. La figure 11 illustre un exemple avec six disques. Quoiqu'elle ne soit pas un facteur d'analyse dans ce projet, la tâche connexe servait à assurer un minimum de charge cognitive durant l'expérimentation.

Lors d'une période de familiarisation, l'audibilité des alarmes et la compréhension des tâches (localisation auditive et tâche connexe) ont été vérifiées. À titre de pratique, une alarme a été présentée 8 fois sans protection auditive et 8 fois avec protection auditive. Bien que les pieds devaient rester fixes au sol, les mouvements de la tête et du haut du corps étaient permis et encouragés.

**Figure 10.** Positionnement des haut-parleurs, du participant et de la tablette sur trépied (tâche connexe) pour les épreuves de localisation.



**Figure 11. Tâche connexe accomplie par les participants – *Tower of London Test.***



L'ordre de présentation des deux types d'alarmes a été contrebalancé sur l'ensemble des participants, de sorte que la moitié des participants ont débuté chaque condition expérimentale avec l'alarme tonale, suivie de l'alarme à large bande, et vice-versa pour la seconde moitié. L'ordre de présentation des conditions d'écoute a également été contrebalancé. Encore une fois, pour limiter l'insertion et le retrait multiples des protecteurs auditifs, toutes les mesures avec un protecteur auditif en particulier se sont succédé avant de passer à l'autre protecteur auditif ou à la condition sans protection auditive.

## 4.2 Résultats

### 4.2.1 Statut auditif des participants

Plusieurs indices fréquentiels contribuent à la capacité de localisation sonore. Le degré de symétrie dans les seuils d'audition des deux oreilles peut également être un facteur déterminant. Pour ce volet, les participants sont catégorisés au tableau 3 sur la base de la moyenne des sons purs (MSP) à 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000 et 8 000 Hz à la pire oreille, et selon la symétrie ou non des seuils audiométriques. Une asymétrie est définie comme une différence interaurale  $\geq 10$  dB HL à au moins trois fréquences audiométriques, ou  $\geq 15$  dB HL à au moins deux fréquences, ou  $\geq 20$  dB HL à au moins une fréquence entre 250 Hz et 8 000 Hz. Une perte unilatérale réfère à une perte auditive à une oreille et des seuils audiométriques à l'intérieur des limites de la normale à l'autre oreille.

**Tableau 3. Classification des participants selon leur perte auditive**

Catégorie de perte auditive	Symétrie des seuils audiométriques		
	Symétrique	Asymétrique	Unilatérale
PA0 : MSP $\leq$ 10 dB HL avec seuils $\leq$ 25 dB HL (N = 28)	28	0	0
PA1 : 10 dB HL < MSP $\leq$ 20 dB HL (N = 8)	2	3	3
PA2 : 20 dB HL < MSP $\leq$ 30 dB HL (N = 9)	5	2	2
PA3 : 30 dB HL < MSP $\leq$ 40 dB HL (N = 10)	3	7	0
PA4 : MSP > 40 dB HL (N = 9)	3	3	3

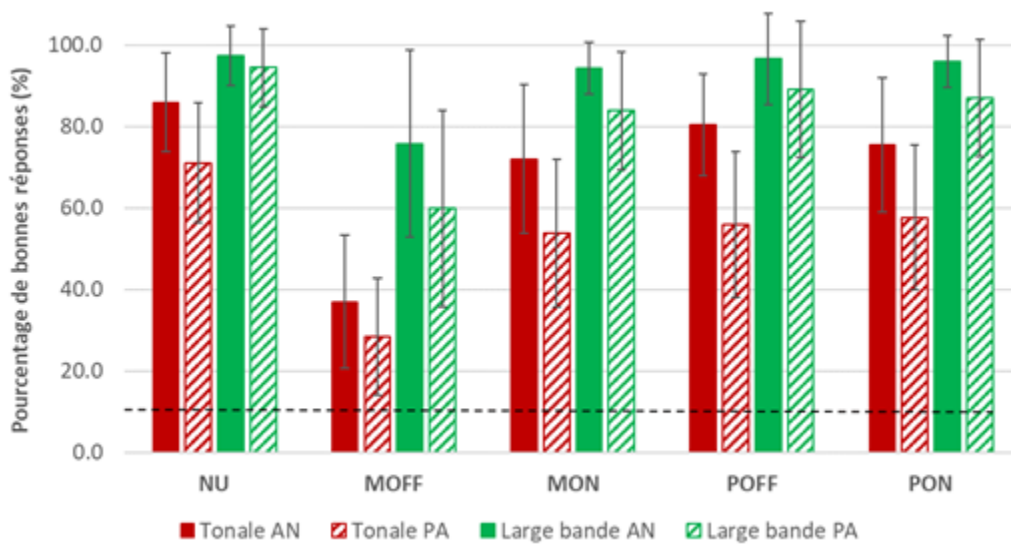
Cette classification s'inspire de celle de Arz *et al.* (2021), mais s'appliquant cette fois à l'ensemble des fréquences audiométriques (MSP calculées sur les octaves de 250 à 8 000 Hz) à la pire oreille au lieu d'une MSP à 500, 1 000 et 2 000 Hz à la meilleure oreille. Les seuils audiométriques de chaque individu avec une perte auditive sont illustrés à l'annexe B.

#### 4.2.2 Données descriptives

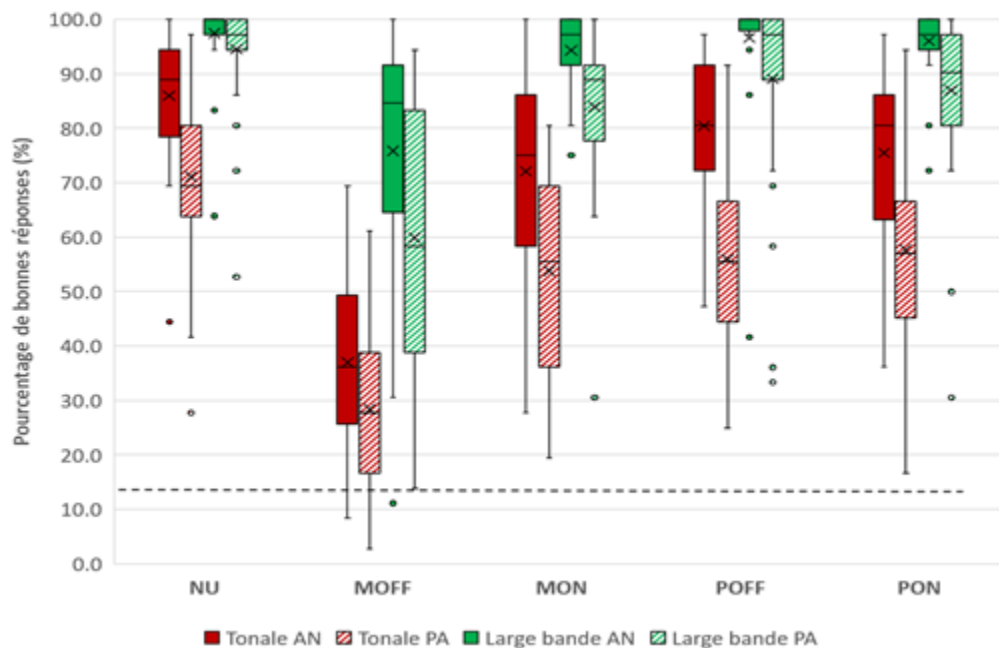
Pour la tâche de localisation des alarmes de recul, une bonne réponse consiste en l'identification correcte du haut-parleur ayant émis le stimulus sonore. Pour chacune des conditions d'écoute, un pourcentage de bonnes réponses a été calculé (nombre de bonnes réponses/36 présentations \* 100) pour l'alarme tonale et pour l'alarme à large bande.

Le pourcentage moyen de bonnes réponses sur l'ensemble des participants est systématiquement plus faible dans la condition des coquilles en mode passif et plus élevé dans la condition sans protection auditive (oreilles nues). Les pourcentages moyens sont illustrés à la figure 12 pour les auditeurs normaux (AN) et pour le groupe d'individus ayant une perte auditive (PA). Chez les participants avec audition normale, le pourcentage moyen de bonnes réponses varie de 37,0 % à 86,0 % pour l'alarme tonale, et de 75,9 % à 97,4 % pour l'alarme à large bande. Pour les participants avec perte auditive, l'étendue est de 28,4 % à 71,1 % pour l'alarme tonale, et de 59,9 % à 94,5 % pour l'alarme à large bande. Un diagramme de type « *Box & Whiskers* » (figure 13) permet de visualiser les données dans un autre format afin de mettre en évidence la dispersion des données.

**Figure 12.** Pourcentage moyen de bonnes réponses par condition d'écoute et type d'alarme de recul pour les deux groupes de participants (niveau de chance = 12,5 %).



**Figure 13.** Diagramme « Box & Whiskers » par condition d'écoute et type d'alarme de recul pour les deux groupes de participants (niveau de chance = 12,5 %).



En général, il appert que de meilleures performances ont été obtenues pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale, et pour le groupe d'auditeurs normaux comparativement au groupe d'individus avec perte auditive. Par ailleurs, les protecteurs



auditifs de type coquilles utilisés en mode passif semblent nuire davantage à la localisation auditive que les autres conditions de protection. Afin de valider ces observations, des analyses statistiques ont été effectuées.

#### 4.2.3 Analyses statistiques

Le plan d'expérience consiste en une analyse à 3 facteurs (type d'alarme, condition d'écoute et statut auditif) avec mesures répétées sur deux facteurs croisés. Le facteur intersujet qui définit le nombre de groupes expérimentaux est une variable catégorique à 2 niveaux (AN : audition normale ; PA : perte auditive) et sert à définir le statut auditif des participants. Les facteurs intrasujets qui définissent le nombre d'observations par participant sont la condition d'écoute (5 niveaux : NU, MOFF, MON, POFF, PON) et le type d'alarme (2 niveaux : tonale et large bande). La variable dépendante est le pourcentage de bonnes réponses sur 36 présentations. Un  $\alpha$  de 0,05 est retenu pour déterminer le niveau de signification lors des analyses statistiques.

Sur un total de 640 observations possibles (64 sujets x 10 conditions), 16 sont manquantes dans différentes conditions. La majorité de ces données manquantes s'explique par un bris des coquilles à rétablissement de son (MON) chez le groupe d'individus avec perte auditive. Ainsi, le plan d'expérience n'est pas équilibré et une ANOVA pour mesures répétées n'est pas possible. Deux modèles ont été considérés, soit un modèle linéaire généralisé mixte avec une variable dépendante binomiale et un modèle linéaire mixte en utilisant une transformation du pourcentage de bonnes réponses pour la variable dépendante. Un diagramme demi-normal avec des enveloppes simulées (Moral *et al.*, 2017) a démontré que le premier modèle n'est pas bien ajusté et ne peut donc être utilisé.

Le modèle choisi est donc un modèle linéaire mixte avec transformation logit (Kutner *et al.*, 2005) de la proportion. Puisque l'ensemble des données contient plusieurs pourcentages (proportions) d'une valeur de 100 %, un léger biais est introduit afin d'appliquer cette transformation. Ainsi, une bonne réponse et une mauvaise réponse sont ajoutées aux conditions expérimentales, pour un total de 38 présentations par condition au lieu de 36, de sorte qu'un pourcentage de 100 % est transformé en un pourcentage de 97,4 % (37/38 bonnes réponses = 97,4 %). Un diagramme demi-normale avec des enveloppes simulées démontre que le modèle avec la transformation logit est bien ajusté malgré la présence de deux observations aberrantes sur 624 observations.

La formule du logit est comme suit :  $\text{logit}(p) = \text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right)$ , où  $p$  est une probabilité, ici la probabilité de bonnes réponses en localisation. Des tests de type II de Wald utilisés pour tester la signification des effets du modèle avec et sans les données aberrantes démontrent que l'exclusion des données aberrantes ne change pas les conclusions tirées des tests. Ainsi, les deux données aberrantes ont été retenues pour les analyses subséquentes.

Le tableau 4 résume les résultats du modèle linéaire mixte où la variable dépendante est le logit de la proportion de bonnes réponses. Les tests partiels (de type II) de Wald démontrent que : 1) les trois effets principaux (Groupe, Condition d'écoute et Type d'alarme) sont fortement significatifs, 2) les effets d'interactions d'ordre 2 ne sont pas significatifs, et 3) les effets d'interactions d'ordre 3 sont faiblement significatifs.

**Tableau 4. Résultats de l'ANOVA pour les performances en localisation sonore et description de la grandeur de l'effet.**

Effets		Statistique (* = significatif)	Différence des AICs	Importance de l'effet
Principaux	Condition d'écoute	$X^2(4) = 634,172$ ; $p < 0,0001^*$	382,7	Important
	Type d'alarme	$X^2(1) = 813,940$ ; $p < 0,0001^*$	489,3	Important
	Groupe	$X^2(1) = 35,888$ ; $p < 0,0001^*$	26,4	Important
Interactions	Condition d'écoute x Type d'alarme	$X^2(4) = 4,0374$ ; $p = 0,40097$	-4,5	-
	Condition d'écoute x Groupe	$X^2(4) = 4,7695$ ; $p = 0,31178$	-3,7	-
	Type d'alarme x Groupe	$X^2(1) = 0,7122$ ; $p = 0,39873$	-1,4	-
	Condition d'écoute x Type d'alarme x Groupe	$X^2(4) = 9,526$ ; $p = 0,04921^*$	0,9	Peu important

Afin de déterminer l'importance des effets, le critère de l'information d'Akaike (AIC) a été utilisé (Akaike, 1973). Ce critère est interprété comme une mesure de la perte d'information lorsqu'on impose un modèle réduit excluant un effet, comparativement à un modèle complet comprenant cet effet. Si la différence des AICc est négative, il y a une perte d'information lorsque l'effet est inclus dans le modèle. Si la différence des AICc est positive, il y a un gain d'information en incluant l'effet dans le modèle. Selon la règle empirique de Burnham et Anderson (2002), une différence des AICs supérieure à 10 est considérée un effet important alors qu'une différence inférieure à 2 indique qu'il est raisonnable d'exclure l'effet. Selon cette analyse, les effets du facteur Type d'alarmes sont les plus importants, suivis de ceux du facteur Condition d'écoute, et finalement ceux du facteur Groupe. Les effets des interactions de deuxième et de troisième ordre ne sont pas importants et il est donc raisonnable de les exclure.

Pour décrire les effets principaux importants, les niveaux de chaque facteur sont comparés par paires (deux à deux) en utilisant la méthode Tukey et la correction de Kenward-Roger pour le nombre de degrés de liberté. Les moyennes estimées ainsi que les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance sont illustrées dans le

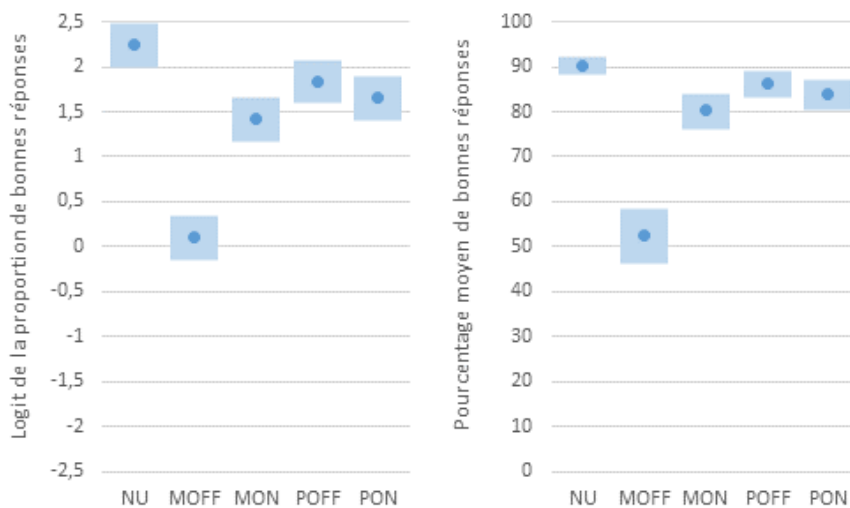
panneau gauche de la figure 14 (Conditions d'écoute), de la figure 15 (Type d'alarme) et de la figure 16 (Groupe). À titre de comparaison, les pourcentages moyens estimés à partir des logits (en utilisant la relation inverse) sont illustrés dans le panneau droit de chacune des figures.

### Facteur Condition d'écoute

Pour l'effet principal de la condition d'écoute, 10 comparaisons par paires sont possibles. Toutes les comparaisons se sont avérées significatives ( $p < 0,05$ ), à l'exception de deux : 1) coquilles en mode de rétablissement de son (MON) vs bouchons en mode de rétablissement de son (PON), avec une différence de 3 % et 2) bouchons en mode passif (POFF) vs bouchons en mode de rétablissement de son (PON), avec une différence de 2 %.

Ainsi, la condition NU est supérieure à toutes les autres conditions d'écoute, par une marge d'environ 4 % (comparativement à POFF) à 38 % (comparativement à MOFF). La condition MOFF est inférieure à toutes les autres conditions par environ 28 % (comparativement à MON) à 38 % (comparativement à NU). Finalement, un écart ne dépassant pas 6 % sépare les conditions MON, POFF et PON.

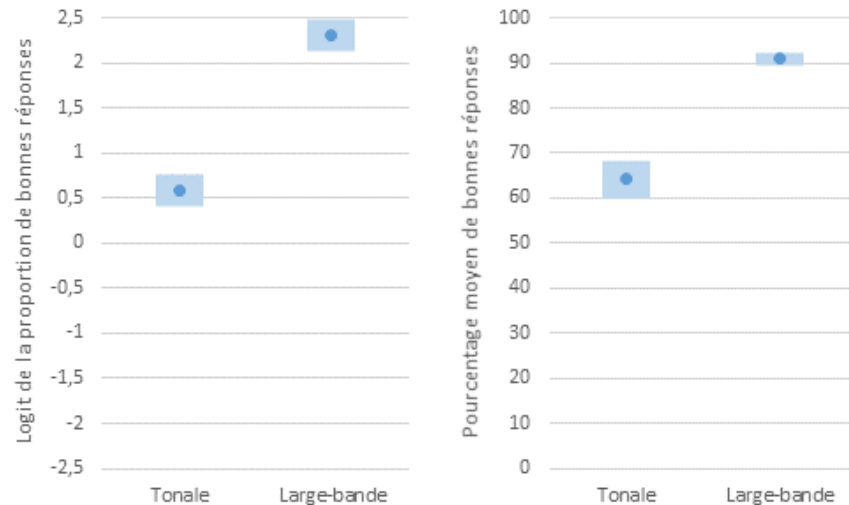
**Figure 14. Effet du facteur Condition d'écoute (panneau de gauche : logit ; panneau de droite : pourcentages estimés de bonnes réponses). La zone bleue délimite les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance.**



### Facteur Type d'alarme

L'alarme à large bande est associée à de meilleures performances en localisation sonore que l'alarme tonale (différence d'environ 27 % de bonnes réponses).

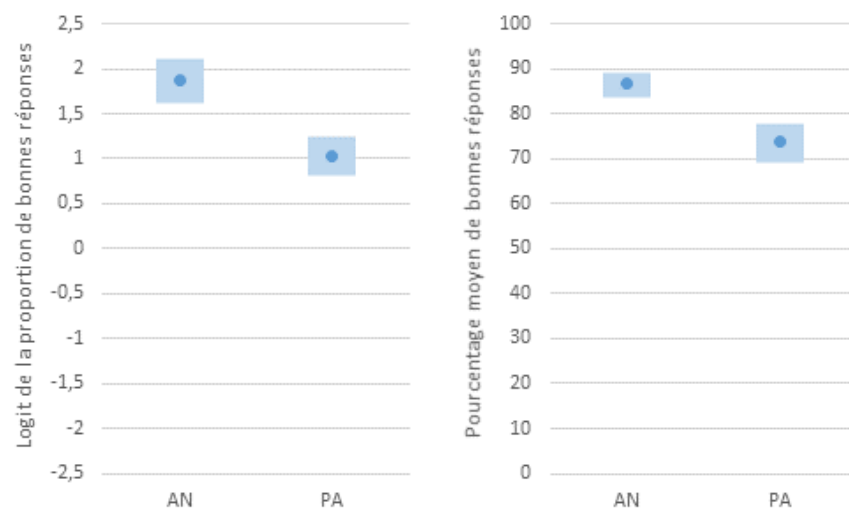
**Figure 15.** Effet du facteur Type d'alarme (panneau de gauche : logit ; panneau de droite : pourcentages estimés de bonnes réponses). La zone bleue délimite les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance.



### Facteur Groupe

Les individus avec audition normale ont de meilleures capacités que ceux avec une perte auditive (différence d'environ 13 % de bonnes réponses).

**Figure 16.** Effet du facteur Groupe (panneau de gauche : logit ; panneau de droite : pourcentages estimés de bonnes réponses). La zone bleue délimite les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance.



## 5. DISCUSSION

### 5.1 Effet des facteurs expérimentaux

Un sommaire des résultats pour chacun des facteurs expérimentaux est présenté au tableau 5, tableau 6 et tableau 7.

#### 5.1.1 Effets du type d'alarme

**Tableau 5. Sommaire des effets du facteur Type d'alarme**

Détection (seuils)	Alarme tonale meilleure que large bande par environ 5 dB
Réaction (seuils)	Alarme large bande meilleure que tonale par environ 2-4 dB dans conditions d'écoute MOFF, POFF et PON.
Localisation (% de réussite)	Alarme large bande meilleure que tonale par 27 %

L'alarme à large bande présente certains avantages comparativement à l'alarme tonale pour assurer la sécurité des travailleurs. Que l'alarme à large bande ait donné lieu à des seuils de détection plus élevés (pires) mais des seuils de réaction plus faibles (meilleurs) que l'alarme tonale est un résultat attendu d'après les études précédentes (Vaillancourt *et al.*, 2012, 2013, 2019 ; Nélisse *et al.*, 2017). Cela peut être expliqué par un plus grand effet masquant du bruit pour la détection sonore et une croissance plus rapide de la sonie (c.-à-d. perception de la force sonore) pour la réaction, en raison du spectre plus riche en fréquences de l'alarme à large bande. L'avantage de l'alarme tonale mise en évidence lors des mesures en laboratoire de détection sonore est contrecarré par le champ sonore beaucoup moins uniforme derrière le véhicule lourd sur le terrain, générant des variations de plusieurs dB sur de très courtes distances (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017).

Il est également attendu que localisation sonore soit plus précise avec l'alarme à large bande qu'avec l'alarme tonale. Sur l'ensemble des conditions d'écoute et des groupes, Vaillancourt *et al.* (2019) avaient obtenu un pourcentage de réussite 28 % plus élevé avec l'alarme à large bande, un résultat presque identique à celui obtenu dans la présente étude, et ce malgré l'utilisation d'un signal plus long dans la présente étude (3 secondes plutôt qu'une seconde).

### 5.1.2 Effets des protecteurs auditifs (condition d'écoute) :

**Tableau 6. Sommaire des effets du facteur Condition d'écoute**

Détection (seuils)	<p>Audition normale :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'impact négatif en mode OFF</li> <li>• OFF meilleur que ON par 3-4 dB</li> <li>• NU meilleur que ON par 2-3 dB</li> </ul> <p>Perte auditive :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de différences significatives entre les conditions, sauf pour POFF et PON qui sont meilleurs que MON (par 2 dB)</li> </ul>
Réaction (seuils)	<p>Alarme tonale :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NU meilleur que ON (par 3-4 dB) et OFF (8-10 dB)</li> <li>• ON meilleur que OFF par 4-7 dB</li> </ul> <p>Alarme à large bande :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NU meilleur que toutes les conditions de protection auditive (par 5 à 7 dB), sauf pour PON</li> <li>• PON meilleur par 4-5 dB que POFF, MOFF et MON</li> </ul>
Localisation (% de réussite)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NU meilleur, de 4 % (POFF) à 38 % (MOFF)</li> <li>• MOFF est pire que toutes les autres conditions, par environ 28 % (MON) à 38 % (NU)</li> <li>• ON meilleur que OFF de 28 % pour les coquilles seulement.</li> <li>• Performance similaire (écart ne dépassant pas 6 %) dans les conditions MON, POFF et PON</li> </ul>

Il a déjà été démontré que les protecteurs auditifs peuvent améliorer de quelques dB la détection sonore chez des individus avec audition normale (voir sous-section 1.2.1). Dans cette étude, une légère amélioration (1 dB) est également notée, mais elle n'atteint pas un seuil statistiquement significatif. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus par Vaillancourt *et al.* (2019) en utilisant la même méthodologie. Dans trois bruits différents, les seuils de détection des alarmes de recul étaient similaires sans protection auditive et avec deux types de protecteurs auditifs en mode éteint.

Le mode de rétablissement de son contribue parfois à une élévation du seuil de détection dans le bruit. Ce phénomène avait également été noté dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2019) avec les mêmes bouchons (3M PELTOR Tactical) et avec un autre type de coquilles (3M PELTOR Protac III). Les auteurs avaient tenté d'expliquer ce phénomène par l'élargissement des filtres auditifs avec une augmentation du niveau de pression sonore, générant un plus grand effet masquant. Une seconde hypothèse impliquait la distorsion du signal lorsque celui-ci est modifié électroniquement par les protecteurs. D'autres études ont également démontré que les protecteurs actifs ne semblent pas offrir un avantage significatif pour la détection sonore dans le bruit (Casali et Wright 1995 ; Christian, 1999 ; Casali *et al.*, 2004 ; Muchenje, 2008).

Quoique le mode de rétablissement de son présente un certain avantage pour les seuils de réaction, il ne permet pas d'atteindre des performances similaires à celles obtenues sans protection auditive (sauf lorsque les bouchons sont utilisés avec l'alarme à large bande). Ceci avait également été démontré par Vaillancourt *et al.* (2019). Dans cette étude, les seuils de réaction étaient plus élevés pour les bouchons en mode passif (mode OFF ou éteint) et s'approchaient graduellement des valeurs sans protection auditive avec une augmentation du volume. Les auteurs avaient émis l'hypothèse qu'une telle amélioration des seuils de réaction avec une augmentation du volume pouvait suggérer que la réaction en réponse à l'alarme n'est pas uniquement guidée par le rapport S/B disponible (qui demeurerait en théorie relativement stable à différents volumes), mais aussi par le niveau sonore absolu de l'alarme.

En ce qui concerne la localisation sonore, la littérature (sous-section 1.3.1) indique clairement que l'utilisation de protecteurs auditifs dégrade généralement les performances, davantage pour les protecteurs de type coquilles que pour les protecteurs de type bouchon. En général, les protecteurs à rétablissement de son ne semblent pas améliorer les performances comparativement aux protecteurs passifs, et si c'est le cas, la performance demeure inférieure à celle sans protection auditive. Les résultats de Vaillancourt *et al.* (2019) ainsi que ceux de la présente étude vont dans le même sens. Cependant, contrairement à l'étude de Vaillancourt *et al.* (2019) une différence significative a été obtenue entre les deux conditions d'utilisation des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H, favorisant le mode de rétablissement de son (28 %). Il est possible que la différence dans les résultats entre les deux études puisse être expliquée par la durée plus longue du signal dans la présente étude, améliorant davantage les conditions qui étaient plus difficiles avec le signal court (coquilles) que les conditions avec de bonnes performances (bouchons).

### 5.1.3 Effets de la perte auditive

**Tableau 7. Sommaire des effets du facteur Groupe**

Détection (seuils)	Auditeurs normaux meilleurs qu'auditeurs avec perte auditive par environ 3 à 5 dB, sauf pour PON.  Élévation du seuil de détection d'environ 0,1-0,2 dB pour chaque dB d'augmentation de la MSP (500, 1 000, 2 000 Hz) de la meilleure oreille.
Réaction (seuils)	Pas de différence significative entre auditeurs normaux et auditeurs avec perte auditive
Localisation (% de réussite)	Auditeurs normaux meilleurs qu'auditeurs avec perte auditive par 13 %

L'augmentation des seuils de détection chez les individus avec perte auditive (environ 5 dB) démontrée dans cette étude va dans le même sens que les constats généraux présentés à la sous-section 1.2.2 pour les signaux avertisseurs, particulièrement lors du port de protecteurs auditifs. Par contre, d'autres études ont démontré un effet plus

important de la perte auditive. Muchenje (2008) a démontré qu'une alarme de recul tonale devait être environ 10 dB plus élevée pour être détectée par des individus avec une perte auditive que par ceux avec une audition normale. Lazarus (2005) a également estimé que l'effet de la perte auditive sur les seuils de détection et de reconnaissance d'un signal pouvait atteindre 10 dB. L'effet dépend entre autres du degré et de la configuration de la perte auditive, du degré d'atténuation du protecteur auditif, ainsi que des caractéristiques du bruit et du signal utilisé. En raison de différences méthodologiques importantes entre les études, il est difficile de comparer la grandeur des effets de la perte auditive.

On note que les individus avec perte auditive de la présente étude ont généralement des seuils d'audition moyens à l'intérieur des limites de la normale ( $\leq 25$  dB HL) en basses fréquences, suivi d'une perte auditive à partir de 2 000 Hz qui s'accroît en passant de PA1 à PA4. Cette configuration de la perte auditive pourrait aider à maintenir une relativement bonne détection sonore des alarmes de recul. Elle pourrait également expliquer pourquoi la perte auditive ne semble pas avoir augmenté de façon significative les seuils de réaction. Cette configuration de perte auditive plus importante sur les hautes fréquences que sur les basses fréquences est également commune chez les travailleurs avec une perte auditive due au bruit ou due à l'âge. Les résultats de Arz. *et al.* (2019), décrits à la sous-section 1.2.2, mettent aussi en évidence l'importance du contenu spectral du signal. À cet effet, la norme ISO 7731 (2003) recommande que les signaux avertisseurs comportent suffisamment d'énergie sous 1 500 Hz, particulièrement lors du port de protecteurs auditifs ou en présence d'une perte auditive.

Malgré l'impact négatif de la perte auditive sur les seuils de détection dans le bruit, notre étude n'a pas mis en évidence un tel impact sur les seuils de réaction. Ce constat pourrait potentiellement s'expliquer par le phénomène d'hyperacousie présent chez les individus avec perte auditive neurosensorielle. L'hyperacousie se traduit par une augmentation plus rapide de la sonie (perception subjective de la force sonore) en fonction du niveau de pression sonore pour les niveaux près du seuil. L'effet anticipé d'une augmentation du seuil de réaction due à la perte auditive pourrait donc être réduit par la présence d'hyperacousie. Par ailleurs, la nature de la perte auditive (p.ex., synaptopathie, le trouble du spectre de la neuropathie auditive, une perte neurosensorielle vs conductive) pourrait avoir un effet sur les performances. Peu d'études ayant porté spécifiquement sur les mesures de perception des avertisseurs sonores à des niveaux supraseuils, il est difficile de confirmer notre constat pour tout trouble auditif.

Finalement, il est bien documenté dans la littérature que la perte auditive nuit aux capacités de localisation sonore (voir sous-section 1.3.2).



## 5.2 Autres considérations

### 5.2.1 Effet de la durée du signal

Dans Vaillancourt *et al.* (2019), le pourcentage de réussite moyen en localisation sonore sans protection auditive était 74 % pour l'alarme à large bande et 38 % pour l'alarme tonale dans un premier groupe d'individus avec audition normale, comparativement à 72 % pour l'alarme à large bande et 35 % pour l'alarme tonale dans un second groupe d'individus avec audition normale. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Nélisse *et al.* (2017) en utilisant une méthodologie identique (83 % large bande et 42 % tonale). Dans la présente étude, le taux de réussite dans la condition sans protection auditive s'élève à 97 % pour l'alarme à large bande et 86 % pour l'alarme tonale. La seule différence méthodologique entre les études antérieures et la présente étude est une plus longue durée du signal à localiser (3 secondes vs 1 seconde). Une amélioration des performances était attendue puisque la présence d'un signal long permettant d'utiliser des mouvements de la tête qui facilitent la localisation sonore (Noble, 1981 ; Brungart *et al.*, 2007 ; Gallagher *et al.*, 2014, 2015ab ; Nélisse *et al.*, 2017). Dans les études ayant opté pour un signal court, la performance moyenne en localisation avec l'alarme à large bande était presque le double de celle avec l'alarme tonale. Dans la présente étude, une différence de seulement 11 % est notée entre les deux alarmes. Ceci pourrait s'expliquer par un effet de plafond dans la localisation de l'alarme à large bande. En effet, dans le groupe d'individus avec audition normale, 20 des 28 participants ont obtenu un taux de réussite de 100 %.

### 5.2.2 Ajustement optimal des alarmes de recul

Au sein des deux groupes (audition normale et perte auditive), l'écart entre les seuils de détection et les seuils de réaction est plus élevé pour l'alarme tonale (environ 21-22 dB) que pour l'alarme à large bande (environ 15-16 dB). Les seuils de réaction sont donc compatibles avec les recommandations générales pour l'ajustement des avertisseurs sonores, soit un niveau de 10-15 dB au-dessus du seuil masqué (Wilkins et Martin, 1978 ; Patterson, 1982 ; Coleman *et al.*, 1984 ; Laroche *et al.*, 1991 ; Zheng *et al.*, 2007). En fait, ces valeurs sont à l'intérieur de la plage de 12 à 25 dB au-dessus des seuils masqués, préconisés dans l'outil Détectson (Laroche *et al.*, 1991 ; Zheng *et al.*, 2007). Les seuils de réaction peuvent donc être utilisés pour faire des recommandations en lien avec l'ajustement du niveau sonore des alarmes de recul, comme il avait été fait dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2019).

Sur la base des données du 3<sup>e</sup> quartile des seuils de réaction de la figure 9 et des analyses statistiques qui ne démontrent aucun effet de groupe (audition normale vs perte auditive), les rapports S/B indiqués dans le tableau 8 permettraient d'assurer une réaction adéquate chez 75 % des individus.

**Tableau 8. Rapports S/B (en dB) permettant d'assurer une réaction adéquate chez 75 % des individus.**

Condition	Alarme Tonale	Alarme à large bande
NU	0	0
MOFF	12	8
POFF	10	8
MON	3	7
PON	5	1

### 5.3 Limites de l'étude :

Bien que les protecteurs à rétablissement de son utilisés dans cette étude ne semblent pas restaurer les performances auditives à des niveaux obtenus sans protecteurs auditifs, ils peuvent offrir certains avantages comparativement aux protecteurs passifs (mode OFF ou éteint) en ce qui a trait au seuil de détection dans le silence (jusqu'à 25 dB), au seuil de réaction dans le bruit (jusqu'à 7 dB), et à la localisation sonore dans certains cas (28 % pour les coquilles). Ces résultats ne peuvent pas toutefois être généralisés à l'ensemble des protecteurs à rétablissement de son disponibles sur le marché, en raison de différents paramètres des circuits de compression et du niveau d'amplification offert par chaque produit. D'ailleurs, dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2019) avec des signaux d'alarmes de plus brève durée (1 seconde), les protecteurs auditifs à rétablissement de son n'ont généralement pas pu restaurer les performances en localisation sonore, du moins pas au niveau de performance obtenu sans protection auditive, les résultats étant souvent similaires ou pires que ceux obtenus lorsqu'utilisés en mode désactivé (donc comparable à une protection auditive passive). D'autres études n'ont pas non plus noté de bénéfice en localisation sonore en faveur des protecteurs à rétablissement de son (Alali, 2011 ; Alali et Casali, 2011 ; Brown *et al.*, 2015 ; Brungart *et al.*, 2007 ; Casali et Alali, 2010 ; Smalt *et al.*, 2019 ; Zimpfer et Sarafian, 2014).

Afin de limiter le nombre de conditions expérimentales, un seul bruit a été utilisé. Dans les études antérieures (Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019), les auteurs ont démontré que les seuils de réaction des alarmes de recul sont moins sensibles aux caractéristiques spectrales et temporelles du bruit ambiant que les seuils de détection. L'ajout de bruits dans la présente expérimentation aurait pu démontrer des différences importantes, particulièrement en ce qui concerne les seuils de détection chez les gens avec une perte auditive, en raison d'une interaction possible entre les caractéristiques spectrales du bruit et la configuration de la perte auditive. Comme ce sont les seuils de réaction qui semblent les plus appropriés pour guider l'ajustement des alarmes de recul, le fait d'ajouter des bruits à la présente étude n'aurait vraisemblablement pas changé les conclusions.

Dans la présente étude, l'attention des participants était pleinement dirigée vers la tâche de détection et de réaction. Dans le milieu de travail, l'attention des travailleurs est souvent détournée afin d'effectuer plusieurs tâches simultanément, ce qui pourrait avoir un impact sur les seuils de détection et de réaction. L'effet du niveau d'attention, de l'attention partagée et de la complexité d'une tâche connexe pourrait être examiné dans des études futures. De plus, considérant la variabilité des résultats et la subjectivité de la tâche de réaction, le recours à des mesures objectives comme le temps de réaction électrodermale (Taffou *et al.*, 2021) pourrait être envisagé.

Au niveau méthodologique, un signal de plus longue durée (3 secondes) a été utilisé pour la tâche de localisation sonore. Pour l'alarme à large bande, la précision en localisation sonore est excellente chez les gens avec audition normale (> 90 %) et très bonne chez les gens avec perte auditive (> 80 %), sauf dans la condition d'utilisation de coquilles en mode passif (mode OFF ou éteint). Un signal plus long que 3 secondes aurait possiblement permis d'atteindre de meilleures performances dans toutes les conditions d'écoute. Il est par contre important de documenter les performances pour un signal relativement court afin de prendre en compte les situations où un travailleur doit réagir rapidement afin de se déplacer hors de la zone de danger. Puisque la norme SAE J1741 préconise un temps de réaction de 2 secondes pour un tel dégagement, le choix d'un signal un peu plus long que celui utilisé par Nélisse *et al.* (2017) et par Vaillancourt *et al.* (2019) (environ 1 seconde) semblait un bon compromis, tout en évitant les effets de planchers anticipés chez certains individus avec perte auditive. Par ailleurs, il serait intéressant d'ajouter une mesure du temps de réaction des participants dans de telles expérimentations.

Le recrutement d'individus avec perte auditive étant toujours plus difficile que celui de participants avec audition normale, l'étendue du type, du degré et de la configuration de la perte auditive est limitée dans la présente étude. Le nombre d'individus avec perte auditive étant limité, il était difficile de faire des analyses plus fines sur la base du degré et de la configuration de la perte. Ainsi, les participants avec perte auditive ont tous été regroupés dans une même catégorie. On peut aussi souligner que la frontière entre normo-entendants et individus avec perte auditive pourrait influencer les résultats (moyenne et variabilité). Dans des études futures, il pourrait être de mise de créer un plus grand écart entre les deux groupes, par exemple, en éliminant les individus ayant des seuils auditifs près de la limite de normalité, peu importe comment cette dernière est définie.

Par ailleurs, l'âge moyen des individus avec perte auditive est plus du double celui des participants avec audition normale. Il est donc anticipé que des effets d'âge, en plus de ceux de la perte auditive, puissent avoir eu une influence sur les résultats. Quoiqu'un échantillon plus représentatif des travailleurs encore actifs sur le marché du travail aurait été intéressant, il est important de considérer les travailleurs plus âgés (qui sont possiblement plus à risque en raison d'un effet combiné d'âge et de perte auditive), afin d'assurer la sécurité de tous.

# CONCLUSION

## Constats généraux

Les résultats de l'étude permettent de vérifier certaines hypothèses émises à la sous-section 2.2 sur la base de l'état des connaissances. Ainsi, on peut constater que :

- L'alarme à large bande présente certains avantages comparativement à l'alarme tonale, incluant des seuils de réaction moyens plus faibles (jusqu'à 4 dB) et un meilleur taux de réussite en localisation sonore (d'environ 27 %). Quoique les seuils de détection dans le bruit sont plus élevés pour l'alarme à large bande, ceci ne représente pas un désavantage marqué étant donné la distribution sonore beaucoup plus uniforme de cette alarme sur le terrain que pour l'alarme tonale avec laquelle on retrouve des variations erratiques du niveau sonore de plus plusieurs dB sur de courtes distances à l'arrière du véhicule (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017).
- Dans l'ensemble, la perte auditive a un impact négatif sur les seuils de détection moyens dans le bruit (jusqu'à 5 dB) et sur la localisation sonore (environ 13 %), alors qu'un effet non significatif est noté sur les seuils de réaction.
- Les performances en localisation sonore varient grandement d'un individu à l'autre chez les participants avec perte auditive.
- Pour toutes les tâches, la performance sans protection auditive est meilleure que celle avec protection auditive.
- Comparativement à la condition sans protection auditive, les protecteurs auditifs utilisés en mode passif (mode OFF ou éteint) n'ont pas d'effet significatif sur les seuils de détection moyens dans le bruit, mais contribuent à une augmentation du seuil de réaction moyen pouvant atteindre 10 dB pour l'alarme tonale et 7 dB pour l'alarme à large bande, et une diminution du taux de réussite en localisation sonore de 4 % dans le cas des bouchons et 38 % dans le cas des coquilles.
- L'effet du mode de rétablissement de son sur les seuils de détection moyens est plus important dans le silence (amélioration pouvant atteindre 25 dB) que dans le bruit (détérioration pouvant atteindre 4 dB), comparativement au mode éteint.
- Les protecteurs à rétablissement de son ne permettent pas une restauration complète de l'audibilité des alarmes de recul, bien qu'ils présentent un certain avantage comparativement aux protecteurs utilisés en mode éteint pour les seuils de réaction moyens dans le bruit (jusqu'à 7 dB).
- Les coquilles à rétablissement de son nuisent davantage aux performances en localisation sonore que les bouchons à rétablissement de son, surtout en mode éteint.

Il est à noter que des différences statistiquement significatives ne sont pas toujours représentatives d'un impact significatif ou de différences significatives au niveau écologique (c.-à-d. en pratique sur le terrain). Pour les seuils de détection et de réaction, le pas de mesure utilisé était de 2 dB. Ainsi, des différences de 1-2 pas de mesure (2-4 dB) ne sont probablement pas significatives sur le terrain alors que des différences

plus grandes le deviennent. Ainsi, les seuls effets de la protection auditive sur la détection et la réaction sonore ayant une importance réelle sont : 1) l'augmentation du seuil de détection dans le silence pour les protecteurs en mode passif (mode OFF) et l'amélioration subséquente du seuil en mode de rétablissement de son, et 2) l'augmentation du seuil de réaction lorsque les protecteurs sont utilisés en mode passif (mode OFF) et l'amélioration subséquente en activant le mode de rétablissement sonore.

Dans le même sens, sur 36 présentations du stimulus par condition en localisation sonore, chaque erreur représente une chute de 2,8 % du taux de réussite. Ainsi les différences importantes d'un point de vue pratique en localisation sonore sont vraisemblablement les suivantes : 1) audition normale vs perte auditive, 2) alarme à large bande vs alarme tonale, 3) sans protection auditive vs coquilles (éteintes et en mode de rétablissement de son).

### **Recommandations :**

À l'issue de cette étude, et compte tenu des études précédentes (Vaillancourt *et al.*, 2012 ; Nélisse *et al.*, 2017 ; Vaillancourt *et al.*, 2019), les recommandations suivantes peuvent être formulées dans le contexte de l'utilisation des alarmes de recul et des protecteurs auditifs en milieu de travail bruyant :

- L'alarme à large bande devrait être privilégiée en raison de son avantage important pour la localisation sonore et des seuils de réaction généralement moins élevés qu'avec l'alarme tonale, surtout lors du port de protecteurs auditifs.
- Les protecteurs à rétablissement de son devraient être considérés puisqu'ils peuvent améliorer de façon significative les seuils de détection dans le silence et les seuils de réaction dans le bruit comparativement aux protecteurs passifs.
- Lorsque la localisation sonore est critique pour assurer la sécurité des travailleurs :
  - les bouchons sont recommandés puisque les coquilles semblent nuire davantage aux indices de localisation sonore ;
  - il est recommandé d'offrir une sélection de produits aux travailleurs étant donné qu'il existe des différences importantes entre les différents protecteurs auditifs pouvant influencer la localisation auditive, particulièrement en ce qui concerne les protecteurs à rétablissement de son (p. ex., position des microphones) ;
  - il est recommandé d'offrir une période d'adaptation ou d'essai aux travailleurs étant donné que les performances en localisation sonore varient grandement d'un individu à l'autre, particulièrement chez les participants avec perte auditive.
- On recommande la méthodologie de la norme ISO 9533 pour l'ajustement du niveau sonore des alarmes de recul, en prenant en considération les éléments suivants afin d'assurer une réaction adéquate chez la majorité des travailleurs (audition normale et perte auditive) :
  - un rapport S/B de 0 dB dans la zone de danger à l'arrière du véhicule est adéquat sans protection auditive ;
  - pour les travailleurs qui utilisent des protecteurs auditifs passifs ou des protecteurs auditifs à rétablissement de son en mode passif (OFF/éteint) le

niveau de l'alarme devrait être ajusté à un rapport S/B d'environ 10 dB pour l'alarme tonale. Pour l'alarme à large bande, ce niveau pourrait être réduit de 3 dB ;

- lors de l'utilisation des protecteurs à rétablissement de son, le niveau de l'alarme devrait être ajusté à un S/B d'environ 5 dB ;
- il faut inclure toutes les sources de bruit de l'environnement de travail lors de la mesure du bruit de fond et pas seulement le bruit du moteur du véhicule (seule source de bruit mentionnée dans la norme ISO 9533), sur lequel l'alarme est installée.

Il est important de noter que les recommandations quant aux protecteurs auditifs sont basées sur les résultats obtenus sur un nombre limité de protecteurs auditifs fonctionnels et bien ajustés. Il faut donc exercer une certaine prudence quant à la généralisation à d'autres produits disponibles sur le marché et des contraintes d'utilisation typiques rencontrées dans les divers milieux qui pourraient compromettre la performance de ces protecteurs tant en localisation sonore qu'en détection/réaction. Par exemple, un protecteur défectueux ou mal ajusté d'un côté pourrait nuire particulièrement à la localisation sonore, tout comme le fait de retirer un protecteur d'un seul côté dans le but d'améliorer la communication.

Puisque l'ajustement du niveau de l'alarme demeure une problématique importante en pratique, il est primordial de ne pas limiter les efforts de prévention des accidents à l'utilisation unique des alarmes de recul. Bien que l'alarme sonore de recul demeure obligatoire sur la plupart des véhicules lourds et reste un moyen largement utilisé pour prévenir et alerter les personnes œuvrant à proximité d'un véhicule lourd, elle ne peut à elle seule assurer la protection et la sécurité des travailleurs. La description d'un accident dans lequel un travailleur a été heurté et écrasé par un camion-benne par Landry (2018-2019) témoigne de ce fait. Puisque plusieurs facteurs peuvent contribuer aux accidents de recul (Kazan et Usman, 2013 ; 2018), il est important de préconiser une meilleure conception des plans de circulation et une réduction notable, voire l'élimination, des manœuvres de recul (Pratt *et al.*, 2001; Fan *et al.*, 2014, 2019 ; Department of Water and Environmental Regulation, 2019; Commission for Occupational Safety and Health, 2006, IMC, 2001), ainsi que le recours à des signaux sonores qui attireraient davantage l'attention (Arnal *et al.*, 2019) ou l'utilisation d'autres technologies (Lingard *et al.*, 2013 ; Sammarco *et al.*, 2012). Sur ce dernier sujet, un rapport publié par l'IRSST fait état des connaissances sur les technologies de détection des travailleurs sur les chantiers de construction (Saidi, 2021) alors qu'un second (Robin *et al.*, 2021) offre une piste d'amélioration dans la conception des dispositifs d'alarmes de recul par l'utilisation d'un haut-parleur paramétrique, afin de circonscrire le signal d'alarme dans la zone de danger tout en limitant la nuisance environnementale. Finalement, notons que des recherches sont en cours sur la mise au point de circuits de détection automatique d'alarme et de signalisation au travailleur à même le protecteur auditif (Bernstein *et al.*, 2014 ; Carbonneau *et al.*, 2013). Ce type de produit pourrait éventuellement fournir un deuxième niveau de vigilance pour le travailleur.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abel, S.M., Kunov, H., Pichora-Fuller, M.K., & Alberti, P.W. (1985). Signal Detection in Industrial Noise: Effects of Noise Exposure History, Hearing Loss, and the Use of Ear Protection. *Scand Audiol*, 14(3), 161-173. <https://doi.org/10.3109/01050398509045937>
- Abel, S.M., & Hay, V.H. (1996). Sound localization: The interaction of aging, hearing loss and hearing protection. *Scand Audiol*, 25(1), 3-12. <https://doi.org/10.3109/01050399609047549>
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Second International Symposium on Information Theory, 1973, 267-281 p.
- Alali, K.A. (2011). *Azimuthal localization and detection of vehicular backup alarms under electronic and non-electronic hearing protection devices in noisy and quiet environments*. [Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University]. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/26890>
- Alali, K.A., & Casali, J.G. (2011). The challenge of localizing vehicle backup alarms Effects of passive and electronic hearing protectors, ambient noise level, and backup alarm spectral content. *Noise Health*, 13(51): 99-112. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.77202>
- Alali, K., & Casali, J.G. (2012). Auditory backup alarms: distance-at-first detection via in-situ experimentation on alarm design and hearing protection effects. *Work*, 41 (S1), 3599-3607. <https://content.iospress.com/articles/work/wor0671>
- ANSI (2019). Methods for Manual Pure-Tone Threshold Audiometry. (ANSI/ASA S3.21-2004 R2019). Acoustical Society of America. <https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansiasas3212004r2019>
- Army Corps of Engineers (2009, September). Workplace safety: backup alarms. *Seattle District Safety*
- Gram. Engineering the Edge for Safety Excellence.* <https://www.nonoise.org/resource/construc/safetygram.pdf>
- Arnal, L.H., Kleinschmidt, A., Spinelli, L., Giraud, A-L & Mégevand, P. (2019). The rough sound of salience enhances aversion through neural synchronisation, *Nature Communications*, 10:3671 <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11626-7>
- Arz, J-P., Gettliffe, J-P., & Delattre, P. (2018). Effect of wearing hearing protectors on the audibility of railway warning signals – an experimental study, *Int J Occup Saf Ergon*, 24(1), 149-159 <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1375733>
- Arz, J-P., Grimault, N., & El Sawaf, O. (2019, June 16-19). Effect of wearing hearing protectors on the audibility of railway warning signals for hearing-impaired listeners – an experimental study. *Proceedings of Internoise 2019*, Madrid, Spain. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02331735>

- Arz, J-P., Grimault, N., & El Sawaf, O. (2021). Experimental assessment of the effect of wearing hearing protectors on the audibility of railway warning signals for normal hearing and hearing impaired listeners, *Int J Occup Saf Ergon*, Published online <https://doi.org/10.1080/10803548.2021.1991681>
- AS (2003). Earth-Moving Machinery - Machine-Mounted Forward And Reverse Audible Warning Alarm - Sound Test Method (AS 4742-2003). Standards Australia. <https://webstore.ansi.org/Standards/SAI/47422003>
- Baguley, T. (2012). *Serious Stats: A guide to advanced statistics for the behavioral sciences*. Springer-Nature.
- Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behavior Research Methods*, 37, (3), 379-384.
- Bassett Consulting Engineers (2009). *Broadband Auditory Warning Alarms: Acoustic Performance Investigation (Report No. AA0981-A9B01RP)*. South Australia Department for Transport, Energy and Infrastructure.
- Berger, E.H. (2003). Hearing protection devices. In E.H. Berger, L.H. Royster, J.D. Royster, D.P. Driscoll & M. Layne (Eds.), *The Noise Manual* (5th ed., pp. 379-454). Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.
- Bernstein, E.R., Brammer, A.J., & Yu, G. (2014). Augmented warning sound detection for hearing protectors. *J Acoust Soc Am*, 135(1), EL29-34. <http://dx.doi.org/10.1121/1.4835135>
- Bolia, R.S., & McKinley, R.L. (2000). The Effects of Hearing Protectors on Auditory Localization: Evidence From Audio-Visual Target Acquisition, *Int J Occup Saf Ergon*, 6(3), 309-319. <http://dx.doi.org/10.1080/10803548.2000.11076457>
- Bolia, R.S., D'Angelo, W.R., Mishler, P.J., & Morris, L.J. (2001). Effects of Hearing Protectors on Auditory Localization in Azimuth and Elevation. *Hum Factors*, 43(1), 122-128. <https://doi.org/10.1518%2F001872001775992499>
- Borg, E., Bergkvist, C., & Bagger-Sjöbäck, D. (2008). Effect on Directional Hearing in Hunters Using Amplifying (Level Dependent) Hearing Protectors. *Otol Neurotol*, 29(5), 579-585. [https://journals.lww.com/otology-neurotology/Fulltext/2008/08000/Effect\\_on\\_Directional\\_Hearing\\_in\\_Hunters\\_Using.3.aspx](https://journals.lww.com/otology-neurotology/Fulltext/2008/08000/Effect_on_Directional_Hearing_in_Hunters_Using.3.aspx)
- Brammer, A.J., & Laroche, C. (2012). Noise and communication: A three-year update. *Noise Health*, 14(61), 281-286. doi:10.4103/1463-1741.104894.
- Brown, A.D., Beemer, B.T., Greene, N.T., Argo, T.IV, Meegan, G.D., & Tollin, D.J. (2015). Effects of Active and Passive Hearing Protection Devices on Sound Source Localization, Speech Recognition, and Tone Detection. *PLoS ONE* 10(8): e0136568. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136568>



- Brungart, D.S., Hobbs, B.W., & Hamil, J.T. (2007, October 21-24). A comparison of acoustic and psychoacoustic measurements of pass-through hearing protection devices. *2007 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. New Paltz, NY, USA, pp. 70-73, <https://ieeexplore.ieee.org/document/4063362>
- Burgess, M., & McCarty, M. (2009). Review of alternatives to “beeper” alarms for construction equipment. Department of Environment and Climate Change NSW Government. <https://www.epa.nsw.gov.au/your-environment/noise/industrial-noise/-/media/74d774f4746a4a768f61ec219becb49a.ashx>
- Burnham, K.P., & Anderson, D.R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer-Verlag New York, 2nd edition.
- Butler, R.A., & Planert, N. (1976). The influence of stimulus bandwidth on localization of sound in space. *Percept & Psychophys*, 19(1), 103-108.
- Carbonneau, M-A., Lezzoum, N., Voix, J., & Gagnon, G. (2013). Detection of alarms and warning signals on a digital in-ear device. *Int J Ind Ergon*, 43(6), 503-511. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.07.001>
- Casali, J.G., & Wright, W.H. (1995, October 7-11). Do Amplitude-Sensitive Hearing Protectors Improve Detectability of Vehicle Backup Alarms in Noise? *Proceedings of the 1995 Human Factors and Ergonomics Society 39th Annual Conference*, San Diego, California. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/154193129503901506>
- Casali, J.G., Robinson, G.S., Christian Dabney, E., & Gauger, D. (2004). Effect of Electronic ANR and Conventional Hearing Protectors on Vehicle Backup Alarm Detection in noise. *Hum Factors*, 46(1): 1-10. <https://doi.org/10.1518%2Fhfes.46.1.1.30387>
- Casali, J.G., Ahroon, W.A., & Lancaster, J.A. (2009). A field investigation of hearing protection and hearing enhancement in one device: for soldiers whose ears and lives depend upon it. *Noise Health*, 11(42), 69-90. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.48564>
- Casali, J.G., & Alali, K. (2010). Etymotic EB-15 (Lo Position) BlastPLG™ Evaluation: Backup Alarm Localization Appended Experiment (Audio Lab Report No. 6/9/10-2-HP; ISE Dept. Report No. 201002). Auditory Systems Laboratory, Virginia Tech.
- Casali, J.G., & Robinette, M.B. (2015). Effects of user training with electronically-modulated sound transmission hearing protectors and the open ear on horizontal localization ability, *Int J Audiol*, 54(Sup1), S37-S45. <https://doi.org/10.3109/14992027.2014.973538>
- Catchpole, K.R., McKeown, J.D., & Withington, D.J. (2004). Localizable auditory warning pulses, *Ergonomics* 47(7): 748-771. <https://doi.org/10.1080/00140130310001629739>
- Cave, K.M., Thompson, B., Lee, K., & Casali, J.G. (2020). Optimisation of an auditory azimuth localisation training protocol for military service members. *Int J Audiol*, 59(Sup1), S3-S11. <https://doi.org/10.1080/14992027.2019.1691747>
- CBC News. (2019, February 21). Bye-bye, beep-beep: New backup signal coming to a snowplow near you. <https://www.cbc.ca/news/canada/ottawa/new-back-up-alarm-snow-removal-1.5027996>

- Clasing, J.E., & Casali, J.G. (2014). Warfighter auditory situation awareness: Effects of augmented hearing protection/enhancement devices and TCAPS for military ground combat applications, *Int J Audiol*, 53(sup2), S43-S52. <https://doi.org/10.3109/14992027.2013.860489>
- Christian, E.V. (1999). The Detection of Warning Signals While Wearing Active Noise Reduction and Passive Hearing Protection Devices. [Master's thesis]. Virginia Polytechnic Institute and State University. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/31434>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York, NY: Routledge Academic.
- Coleman, G.J., Graves, R.J., Collier, S.G., Golding, D., Nicholl, A.G., & Simpson, G.C., Sweetland, K.F., & Talbot, C.T. (1984). Communication in noisy environments. *Institute of Occupational Medicine*, Edinburg.
- Commission for Occupational Safety and Health. (2006) *Guidance note - Safe movement of vehicles at workplaces*. Government of Western Australia. [https://www.commerce.wa.gov.au/sites/default/files/atoms/files/safe\\_movement\\_of\\_veh.pdf](https://www.commerce.wa.gov.au/sites/default/files/atoms/files/safe_movement_of_veh.pdf)
- CSA (2019). *Hearing Protection Devices – Performance, selection, care and use*. (CSA Standard Z94.2-14 R2019). <https://www.csagroup.org/store/product/2701515/>
- CTV Vancouver Island (2018, April 5). Ban the beep? Victoria may seek alternatives to noisy back-up alarm of city trucks. CTV News. <https://vancouverisland.ctvnews.ca/ban-the-beep-victoria-may-seek-alternatives-to-noisy-back-up-alarm-of-city-trucks-1.3872926>
- Department of Water and Environmental Regulation. Department of Mines, Industry Regulation and Safety (2019, September). *Audible reversing alarms: considerations for use*. Government of Western Australia. [https://www.commerce.wa.gov.au/sites/default/files/atoms/files/audible\\_reversing\\_alarms.pdf](https://www.commerce.wa.gov.au/sites/default/files/atoms/files/audible_reversing_alarms.pdf)
- Durlach, N.I., Thompson, C.L., & Colburn, H.S. (1981). Binaural Interaction in Impaired Listeners: A Review of Past Research, *Audiology*, 20(3), 181-211. <https://doi.org/10.3109/00206098109072694>
- El Sawaf, O., Arz, J-P., Grimault, N., & Chevret, P. (2019, June 16-19). Audibility of warning signals: methods to evaluate the combined effects of hearing protectors and hearing impairment. *Proceedings of Internoise 2019*, Madrid, Spain. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02331722>
- Fan, W., Choe, S., & Leite, F. (2014). Prevention of back over fatalities in highway work zones: A synthesis of current practices and recommendations. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 3(4), 311-338. <https://doi.org/10.1260/2046-0430.3.4.311>
- Fan, W., Carroll, C., Radley, L., Hostetler, E, Choe, S., Leite, F., Seedah, D., Caldas, C. (2019). Prevention of Backing Fatalities in Construction Work Zones: Final Report. TxDOT

Report 0-6703-1. The University of Texas at Tyler, United States.  
<https://library.ctr.utexas.edu/hostedpdfs/uttyler/0-6703-1.pdf>.

- Firszt, J.B., Reeder, R.M., Dwyer, N.Y., Burton, H., & Holden, L.K. (2015). Localization Training Results in Individuals with Unilateral Severe to Profound Hearing Loss. *Hear Res*, 319, 48-55. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4291285/pdf/nihms645797.pdf>; <https://doi.org/10.1016/j.heares.2014.11.005>
- Firszt., J.B., Reeder, R.M., & Holden, L.K. (2017). Unilateral Hearing Loss: Understanding Speech Recognition and Localization Variability - Implications for Cochlear Implant Candidacy. *Ear Hear*, 38(2), 159-173. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5321788/pdf/nihms815440.pdf>
- Gallagher, H.L., McKinley, R.L., Theis, M.A., Swayne, B.J., & Thompson, E.R. (2014). Performance Assessment of Passive Hearing Protection Devices (Report No. AFRL-RH-WP-TR-2014-0148) Air Force Research Laboratory. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a615393.pdf>
- Gallagher, H.L., Theis, M.A., & Swayne, B.J. (2015a) Performance Assessment of Hearing Protection and Communication Enhancement Devices: Peltor Comtac III and IV (Report No. AFRL-RH-WP-TR-2015-0048. Air Force Research Laboratory. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a621930.pdf>
- Gallagher, H.L., Theis, M.A., & Swayne BJ (2015b) Performance Assessment of the OTTO Hurricane with Invisio V60 and Sonic Defenders EP4 (Report No. AFRL-RH-WP-TR-2015-0075). Air Force Research Laboratory. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a626318.pdf>
- Giguère, C., Laroche, C., Vaillancourt, V., & Soli, S.S. (2010). Modelling Speech Intelligibility in the Noisy Workplace for Normal-hearing and Hearing-impaired Listeners Using Hearing Protectors. *Int J Acoust Vib*, 15(4), 156-167. <http://dx.doi.org/10.20855/ijav.2010.15.4268>
- Hawley, M.L. (2000). *Speech intelligibility, localization and binaural hearing in listeners with normal and impaired hearing*. (Publication No. 9954983) [Doctoral dissertation, Boston University]. ProQuest Dissertations Publishing.
- Heckman, G.M, Kim, R.S, Khan, F.S, Bare, C., & Yamaguchi, G.T. (2011). *Auditory Localization of Backup Alarms: The Effects of Alarm Mounting Location*, SAE Technical Paper 2011-01-0086, <https://doi.org/10.4271/2011-01-0086>
- Hinze, J.W., & Teizer, J. (2011). Visibility-related fatalities related to construction equipment. *Safety Science*, 49(5), 709-718. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.01.007>
- Holzman, D.C. (2011). Vehicle motion alarms: Necessity, noise pollution, or both? *Environ Health Perspect*, 119(1), A30-A33. <https://doi.org/10.1289/ehp.119-A30>
- Homer, J.P. (2008, July 28-30). Audible warning devices used in the mining industry. *Proceedings of the NOISE-CON 2008 conference from The Institute of Noise Control Engineering*, Dearborn, Michigan, USA, 12 p.

- IMC Technical Services Limited (2001). *Improving the safety of workers in the vicinity of mobile plant*. Health and Safety Executive.  
[http://www.hse.gov.uk/research/crr\\_pdf/2001/crr01358.pdf](http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/2001/crr01358.pdf)
- Institut National de Santé Publique du Québec (2014). *Portrait de la surdité professionnelle acceptée par la Commission de la santé et de la sécurité du travail au Québec : 1997-2010 – Troubles de l'audition sous surveillance*.  
[https://www.inspq.gc.ca/pdf/publications/1770\\_Portrait\\_Surdite\\_Professionnelle.pdf](https://www.inspq.gc.ca/pdf/publications/1770_Portrait_Surdite_Professionnelle.pdf)
- International Organization for Standardization (2010). *Earth-moving machinery: Machine-mounted forward and reverse audible warning alarm. Sound test method* (ISO Standard 9533) <https://www.iso.org/standard/42250.html>
- Joubaud, T., Zimpfer, V., Garcia, A., & Langrenne, C. (2015, May 31-June 3). Degradation of front-back spectral cues induced by tactical communication and protective systems. *EuroNoise 2015*, Masstricht, Netherlands.  
<https://www.conforg.fr/euronoise2015/proceedings/data/articles/000100.pdf>
- Kazan, E.E. (2013). *Analysis of fatal and nonfatal accidents involving earthmoving equipment operators and on-foot workers* [doctoral dissertation]. Wayne State University  
[https://digitalcommons.wayne.edu/oa\\_dissertations/731/](https://digitalcommons.wayne.edu/oa_dissertations/731/)
- Kazan, E., & Usmen, M. (2018). Worker safety and injury severity analysis of earthmoving equipment accidents. *J Safety Res*, 65, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.02.008>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022437516303528?via%3Dihub>
- Kilpatrick, R.S. (2017). *Perceptions of Key Stakeholders Regarding the Utilization of Locatable Sound for the Prevention of Occupational Pedestrian Injuries and Fatalities* (Publication No. 10605467) [Doctoral dissertation, Indiana University of Pennsylvania]. ProQuest Dissertations Publishing.
- Kutner, M., Nachtsheim, C., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models*. McGraw-Hill/Irwin, 5<sup>th</sup> edition, 2005.
- Laliberté, D. (2019). *Portrait régional de la surdité professionnelle acceptée par la CNESST pour la période 2002 à 2016 dans la région de la Capitale-Nationale*, Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de la Capitale-Nationale.  
[https://www.ciuss-capitalenationale.gouv.qc.ca/sites/default/files/portrait\\_surdite\\_professionnelle\\_c-n\\_2002-2016\\_2019-07-18.pdf](https://www.ciuss-capitalenationale.gouv.qc.ca/sites/default/files/portrait_surdite_professionnelle_c-n_2002-2016_2019-07-18.pdf)
- Lancaster, J.A., Alali, K., & Casali, J.G. (2007, October 1-5). Interaction of Vehicle Speed and Auditory Detection of Backup Alarms AKA: Can the Construction Worker Get Out of the Way? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 51<sup>st</sup> Annual Meeting*, 51(20), 1421-1424. <https://doi.org/10.1177%2F154193120705102010>
- Landry, K. (2018-2019). Les accidents nous parlent. Manœuvre de recul fatale. *Prévention au travail*, 31(4), 33. <https://www.preventionautravaille.com/les-accidents-nous-parlent/631-manoeuvre-de-recul-fatale.html>

- Laroche, C., Tran Quoc, H., Héту, R., & McDuff, S. (1991). 'Detectsound' : A computerized model for predicting the detectability of warning signals in noisy workplaces. *Appl Acoust*, 32(3), 193-214. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(91\)90003-W](https://doi.org/10.1016/0003-682X(91)90003-W)
- Laroche, C. (2006, July 10-14). Investigation of an accident involving the reverse alarm on a heavy vehicle. *Proceedings IEA 2006. Congress, International Ergonomics Association 16th World Congress*, Maastricht, Netherlands, 6 p.
- Laroche, C., Ross, M.-J., Lefebvre, L., & Larocque, R. (1995). *Détermination des caractéristiques optimales des alarmes de recul*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. <https://www.irsst.gc.ca/publications-et-outils/publication/i/419/n/determination-des-caracteristiques-acoustiques-optimales-des-alarmes-de-recul-r-117>
- Laroche, C., & Lefebvre, L. (1997, June 29-July 4). Improvement in the acoustic characteristics of reverse alarms used on vehicles. *Proceedings of the 13th Triennial Congress of the International Ergonomics Association*, Tampere, Finland, 3, 99-102.
- Laroche, C., & Lefebvre, L. (1998). Determination of optimal acoustic features for reverse alarms: field measurements and the design of a sound propagation model. *Ergonomics*, 41(8), 1203-1221. <https://doi.org/10.1080/001401398186487>
- Lazarus, H. (2005). Signal Recognition and Hearing Protectors With Normal and Impaired Hearing, *Int J Occup Saf Ergon*, 11(3), 233-250  
<https://doi.org/10.1080/10803548.2005.11076646>
- Lee, K., & Casali, J.G. (2019). Learning to localize a broadband tonal complex signal with advanced hearing protectors and TCAPS: the effectiveness of training on open-ear vs. device-occluded performance. *Int J Audiol*, 58(Sup1), S65-S73.  
<https://doi.org/10.1080/14992027.2018.1532118>
- Lingard, H., Cooke, T., & Gharaie, E. (2013). The how and why of plant-related fatalities in the Australian construction industry. *Eng Constr Archit Manag*, 20(4), 365-380.  
<http://dx.doi.org/10.1108/ECAM-09-2011-0085>.
- Lorenzi, C., Gatehouse, S., & Lever, C. (1999). Sound localization in noise in hearing-impaired listeners. *J Acoust Soc Am*, 105(6), 3454-3463. <https://doi.org/10.1121/1.424672>
- Martin, F. N., & Clark, J. G. (2003). Introduction to audiology (8th ed.). Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Masterson, E.A., Bushnell, P.T., Themann, C.L., & Morata, T.C. (2016). Hearing Impairment Among Noise-Exposed Workers — United States, 2003–2012. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2016; 65:389–394. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6515a2>
- Maxwell, S.E. (1980). Pairwise Multiple Comparisons in Repeated Measures Designs. *Journal of Educational Statistics*, 5, (3 Autumn 1980), 269-287.
- McKinley, R.L. (2000). Communication and localization with hearing protectors (Report No. ADA385785). Air Force Research Laboratory.  
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADP010343.pdf>



- Młyński, R., & Kozłowski, E. (2016). Directivity of hearing of auditory danger signal emitted by overhead crane. *Med Pr*, 67(5), 589-597. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00407>
- Mlynski, R., & Kozlowski, E. (2017). Examination of recognition of the direction from which an industrial truck auditory danger signal was coming. *Measurement Automation Monitoring*, 63(1), 6-9.
- Mlynski, R., & Kozlowski, E. (2019). Localization of Vehicle Back-Up Alarms by Users of Level-Dependent Hearing Protectors under Industrial Noise Conditions Generated at a Forge. *Int J Environ Res Public Health* 16(3), 394. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030394>
- Moral, R. A., Hinde, J., & Demétrio, C. G. B. (2017). Half-Normal Plots and Overdispersed Models in R: The hnp Package. *Journal of Statistical Software*, 81(10), 1–23. <https://doi.org/10.18637/jss.v081.i10>
- Morgan, H.P., & Peppin, R.J. (2008, July). “Noiseless” and safer back-up alarms. *Proceedings of the NOISE-CON 2008 conference from The Institute of Noise Control Engineering* Dearborn, Michigan, 8p. [https://www.safequarry.com/presentations/2008/S3\\_Henry\\_Morgan.pdf](https://www.safequarry.com/presentations/2008/S3_Henry_Morgan.pdf)
- Muchenje, L.S. (2008). *Determination of backup alarm masked threshold in construction noise*. [Master’s thesis]. Virginia Polytechnic Institute and State University. [https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/33419/Lovejoy.Muchenje\\_Thesis.pdf](https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/33419/Lovejoy.Muchenje_Thesis.pdf)
- National Highway Traffic Safety Administration. (2006). *Estimation of Backover Fatalities*. U.S. Department of Transportation. Office of Regulatory Analysis and Evaluation National Center for Statistics and Analysis. <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/nhtsa-2006-25579-0001-2.pdf>
- Neill, B. (2016, November 30). Turcot construction vehicles feature quieter reverse sound. CBC News. <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/turcot-construction-truck-noise-beep-1.3873905>
- Nélisse, H, Vaillancourt, V., Laroche, C., Giguère, C., & Boutin, J. (2017). *Évaluation de la performance acoustique des alarmes de recul en milieu ouvert en vue d’une utilisation optimale dans les environnements de travail*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSSST/R-977.pdf>
- Nelson, E., Reeder, R.M., Holden, L.K., & Firszt, J.B. (2018). Front- and rear-facing horizontal sound localization results in adults with unilateral hearing loss and normal hearing. *Hear Res*, 372, 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.03.016>
- Noble, W. G. (1981). Earmuffs, exploratory head movements, and horizontal and vertical sound localization. *Journal of Auditory Research*, 21(1), 1-12.
- Noble, W.G., Murray, N., & Waugh, R. (1990). The Effect of Various Hearing Protectors on Sound Localization in the Horizontal and Vertical Planes. *Am Ind Hyg Assoc J*, 51(7), 370-377. <https://doi.org/10.1080/15298669091369808>

- Noble, W., Byrne, D., & Lepage, B. (1994). Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment. *J Acoust Soc Am*, 95(2), 992-1005.  
<https://doi.org/10.1121/1.408404>
- Noble, W., Byrne, D., & Ter-Horst, K. (1997). Auditory localization, detection of spatial separateness, and speech hearing in noise by hearing impaired listeners. *J Acoust Soc Am*, 102(4), 2343-2352. <https://doi.org/10.1121/1.419618>
- Patterson, R.D. (1982). Guidelines for auditory warning systems on civil aircraft. Department of Physiology, Development and Neuroscience, University of Cambridge.  
[https://www.pdn.cam.ac.uk/other-pages/cnbh/files/AuditoryWarningSystems\\_CAA82017.pdf](https://www.pdn.cam.ac.uk/other-pages/cnbh/files/AuditoryWarningSystems_CAA82017.pdf)
- Popoff-Asotoff, P., Holgate, J., & Macpherson, J. (2012, November 21-23). Which is Safer – Tonal or Broadband Reversing Alarms? Proceedings of Acoustics 2012, Fremantle, Australia.  
[https://www.acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/AAS2012/papers/p126.pdf](https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2012/papers/p126.pdf)
- Pratt, S.G., Fosbroke, D.E., & Marsh, S.M. (2001) *Building safer highway work zone*. Department of Health and Human Services.  
<https://www.elcosh.org/record/document/1388/d000461.pdf>.
- Purswell, J.P., & Purswell, J.L. (2001). The effectiveness of audible backup alarms as indicated by OSHA accident investigation records. *Advances in occupation ergonomics and safety*, 4, 444-452, IOS press.
- Purswell, J.P., & Purswell, J.L. (2011). The Distribution of Pedestrian-Backing Vehicle Accidents by Backup Alarm Status and Vehicle Type. In W. Karwowski & G. Savendy (Eds.), *Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries* (1<sup>st</sup> ed., pp. 1168-1177).
- Robin, O., Berry, A., & Nélisse, H. (2021). Étude de l'applicabilité de haut-parleurs paramétriques au développement de nouveaux concepts d'alarmes de recul. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.  
<https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/101098/n/applicabilite-haut-parleurs-alarmes-recul>
- Robinson, G.S., & Casali, J.G. (1995). Audibility of reverse alarms under hearing protectors for normal and hearing-impaired listeners. *Ergonomics*, 38(11), 2281-2299.  
<https://doi.org/10.1080/00140139508925268>
- SAE International (1999). *Discriminating Back-Up Alarm System Standard*. (SAE Standard J1741). <https://webstore.ansi.org/standards/sae/sae17411999j1741>
- SAE International (2009). *Alarm: Backup: Electric laboratory performance testing*. (SAE Standard J994). [https://www.sae.org/standards/content/j994\\_200903/](https://www.sae.org/standards/content/j994_200903/)
- Saidi, A. (2021). État de l'art portant sur les technologies de détection de personnes applicables aux chantiers de construction. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/QR-1120.pdf?v=2021-12-15>
- IRSST** ■ Effet de la perte auditive et du port de protecteurs auditifs sur la perception et la localisation auditive des alarmes de recul

- Sammarco, J., Gallagher, S., Mayton, A., & Srednicki, J. (2012). A visual warning system to reduce struck-by or pinning accidents involving mobile mining equipment. *Appl Ergon*, 43(6), 1058-1065. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.03.006>
- Scharine, A.A., & Weatherless, R.A. (2014). U.S. Marine Corps Level-Dependent Hearing Protector Assessment: Objective Measures of Hearing Protection Devices (Report No. ARL-TR-6780). Army Research Laboratory. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA597684.pdf>
- Scharine, A.A., Domanico, M., Fouts, A.N., Fluitt, K., & Mermagen, T. (2018). Auditory Localization Performance with Asymmetric Integrated Eye and Ear Protection (Report No. AD1049225). US Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1049225>
- Simpson, B.D., Bolia, R.S., McKinley, R.L., & Brungart, D.S. (2005). The Impact of Hearing Protection on Sound Localization and Orienting Behavior. *Hum Factors*, 47(1), 188-198. <https://doi.org/10.1518/0018720053653866>
- Slattery III, W.H., & Middlebrooks, J.C. (1994). Monaural sound localization: Acute versus chronic unilateral impairment. *Hear Res*, 75(1-2), 38-46. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0378-5955(94)90053-1)
- Smalt, C.J., Calamia, P.T., Dumas, A.P., Perricone, J.P., Patel, T., Bobrow, J., Collins, P.P., Markey, M.L., & Quatieri, T.F. (2019). The Effect of Hearing-Protection Devices on Auditory Situational Awareness and Listening Effort. *Ear Hear*, 41(1), 82-94. doi: 10.1097/AUD.0000000000000733.
- Suter, A.H. (1989). The effects of hearing protectors on speech communication and the perception of warning signals (Report No. ADA212521). U.S. Army Human Engineering Laboratory. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA212521.pdf>
- Taffou, M., Suied, C. & Viaud-Delmon, I. (2021). Auditory roughness elicits defense Reactions. *Scientific Reports* | (2021) 11:956, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79767-0>
- Takimoto, M., Nishino, T., Itou, K., & Takeda, K. (2007). Sound localization under conditions of covered ears on the horizontal plane. *Acoust Sci & Tech*, 28(5), 335-342. <https://doi.org/10.1250/ast.28.335>
- Talcott, K.A., Casali, J.G., Keady, J. P., & Killion, M. (2012). Azimuthal auditory localization of gunshots in a realistic field environment: effects of open-ear versus hearing protection-enhancement devices (HPEDs), military vehicle noise, and hearing impairment. *Int J Audiol*, 51(Suppl 1), S20–S30. <https://doi.org/10.3109/14992027.2011.631591>
- Vaillancourt, V., Laroche, C., Giguère, C., Beaulieu, M-A., Legault, J-P. (2011). Evaluation of Auditory Functions for Royal Canadian Mounted Police Officers, *J Am Acad Audiol* 22(6), 313–331. DOI : 10.3766/jaaa.22.6.2
- Vaillancourt, V., Nélisse, H., Laroche, C., Giguère, C., Boutin, J., & Laferrière, P. (2012). *Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds : Évaluation de trois types d’alarmes sonores de recul*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-763.pdf>



- Vaillancourt, V., Nélisse, H., Laroche, C., Giguère, C., Boutin, J., & Laferrière, P. (2013). Comparison of sound propagation and perception of three types of backup alarms with regards to worker safety. *Noise Health*, 15(67), 420-436. doi: 10.4103/1463-1741.121249
- Vaillancourt, V., Laroche, C., Giguère, C., & Nélisse, H. (2019). *Effet du port de protecteurs auditifs et de casques de sécurité sur la perception et la localisation auditives des alarmes de recul*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1067.pdf>
- Van Wanrooij, M.M., & Van Opstal, A.J. (2004). Contribution of Head Shadow and Pinna Cues to Chronic Monaural Sound Localization. *J Neurosci*, 24(17), 4163-4171. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0048-04.2004>
- Vause, N.L., & Grantham, D.W. (1999). Effects of Earplugs and Protective Headgear on Auditory Localization Ability in the Horizontal Plane. *Hum Factors*, 41(2), 282-294. <https://doi.org/10.1518/001872099779591213>
- Victoria Times. (2016, December 17). Bye-bye to the beep: white noise a kinder, gentler backup alert. Times Colonist. <https://www.timescolonist.com/bc-news/bye-bye-to-the-beep-white-noise-a-kinder-gentler-backup-alert-4644524>
- WHO (2000). Guidelines for community noise, Berglund B, Lindvall T & Schwela DH (Eds.) - World Health Organization, Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/docstore/peh/noise/Comnoise-1.pdf>
- Wilkins, P.A. (1984). A Field Study to Assess the Effects of Wearing Hearing Protectors on the Perception of Warning Sounds in an Industrial Environment. *Appl Acoust* 17(6), 413-437. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(84\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0003-682X(84)90003-3)
- Wilkins, P.A., & Martin, A.M. (1978). The effect of hearing protectors on the perception of warning and indicator sounds: a general review. Institute of Sound and Vibration Research, Technical Report 98, University of Southampton, United States.
- Wilkins, P., & Martin, A.M. (1987). Hearing Protection and Warning Sounds in Industry – A Review. *Appl Acoust* 21, 267-293.
- Withington, D.J. (1996). The quest for better ambulance sirens. *Ambulance UK*, 11, 20-21. <http://www.soundalert.com/pdfs/ambuk.pdf>
- Withington, D.J. (1999). Localisable Alarms. Extract from *Human Factors in Auditory Warnings – Edited by Neville A Stanton & Judy Edworthy*, Ashgate Publishing Ltd, ISBN 0-291-39849-9. [https://firealarmresources.com/wp-content/uploads/2018/06/localizable\\_alarms.pdf](https://firealarmresources.com/wp-content/uploads/2018/06/localizable_alarms.pdf)
- Withington, D.J. (2000, July 29-August 4). The use of directional sound to improve the safety of auditory warnings. Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress, San Diego, USA, 3-726 – 3-729. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/154193120004402260>

- Withington, D.J. (2004, May). Reversing Goes Broadband. *Quarry Management Journal*.  
[https://www.agg-net.com/files/aggnet/attachments/articles/reversing\\_goes\\_broadband\\_0.pdf](https://www.agg-net.com/files/aggnet/attachments/articles/reversing_goes_broadband_0.pdf)
- Withington DJ & Paterson SE (1998). Safer Sirens. *Fire Engineers Journal*, 48, 6-10.  
<http://www.soundalert.com/pdfs/fej.pdf>
- Zheng, Y., Giguère, C., Laroche, C., Sabourin, C., Gagné, A., & Elyea, M. (2007). A Psychoacoustical Model for Specifying the Level and Spectrum of Acoustic Warning Signals in the Workplace. *J Occup Environ Hyg*, 4(2), 87-98.  
<https://doi.org/10.1080/15459620601115768>.
- Zimpfer, V., & Sarafian, D. (2014). Impact of hearing protection devices on sound localization performance. *Front Neurosci*, 8,135. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00135>
- Zurek, P.M. (1986). Consequences of conductive auditory impairment for binaural hearing. *J Acoust Soc Am* 80(2), 466-472. <https://doi.org/10.1121/1.394041>

## ANNEXE A

### A.1 Consignes pour la mesure des seuils de détection et des seuils de réaction

Les consignes suivantes étaient données aux participants pour les essais sur les seuils de détection et seuils de réaction.

#### Seuils de détection :

- Pendant ce test, nous voulons mesurer votre seuil de détection pour deux alarmes de recul différentes. Votre seuil représente le plus bas niveau de l'alarme qui soit tout juste perceptible (soit le niveau de l'alarme qui vous permet de tout juste commencer à l'entendre).
- Au départ, l'écran indiquera « *Please wait* (veuillez patienter)... »
- Après que le bruit soit présenté, l'option « *Play* » devrait apparaître pour les deux alarmes.
- Appuyez sur « *Play* » pour faire jouer la première alarme. Les symboles « + » and « - » vont ensuite apparaître. Utilisez le symbole « - » pour diminuer le niveau de l'alarme jusqu'à ce que cette dernière ne soit plus entendue ; ensuite, faites augmenter (« + ») son niveau jusqu'à ce que l'alarme soit tout juste entendue par-dessus le bruit de fond. Veuillez répéter ces étapes à plusieurs reprises jusqu'à ce que vous soyez satisfait de votre réponse.
- Lorsque votre seuil a été établi pour la première alarme, veuillez répéter avec la seconde en appuyant sur « *Play* » du second panneau de présentation sur l'écran de l'ordinateur tablette.
- Une fois satisfait de vos réponses pour les deux alarmes, appuyez sur « *Done* » (terminé).
- Cette même procédure sera répétée pour tous les bruits. Après une courte pause, l'expérimentation sera répétée une seconde fois afin de déterminer la fiabilité de vos seuils mesurés avec cette approche.

#### Seuils de réaction :

- Pendant ce test, nous voulons identifier le niveau de l'alarme à partir duquel cette dernière évoque une sensation d'urgence suffisante pour que, sur le terrain, vous réagissiez en vous retournant vers le camion ou en vous déplaçant en dehors de la trajectoire du camion qui s'approche (la zone de danger).
- Au départ, l'écran indiquera « *Please wait* (veuillez patienter)... »
- Après que le bruit soit présenté, l'option « *Play* » devrait apparaître pour les deux alarmes.
- Appuyez sur « *Play* » pour faire jouer la première alarme. Les symboles « + » and « - » vont ensuite apparaître. Utilisez le symbole « + » pour faire augmenter le niveau de l'alarme jusqu'au point où vous ressentez le besoin de réagir au son de l'alarme en vous retournant vers le camion ou en vous déplaçant hors de la zone de danger

(de la trajectoire du camion qui s'approche). Vous pouvez également diminuer le niveau de l'alarme au besoin à l'aide du symbole « - ». Vous pouvez répéter ces étapes à plusieurs reprises jusqu'à ce que vous soyez satisfait de votre réponse.

- Lorsque votre seuil a été établi pour la première alarme, veuillez répéter avec la seconde en appuyant sur « *Play* » du second panneau de présentation sur l'écran de l'ordinateur tablette.
- Une fois satisfait avec vos réponses pour les deux alarmes, appuyez sur « *Done* » (terminé).
- Cette même procédure sera répétée pour tous les bruits. Après une courte pause, l'expérimentation sera répétée une seconde fois afin de déterminer la fiabilité de vos seuils mesurés avec cette approche.

## ANNEXE B

### B.1 Seuils audiométriques à l'oreille droite (cercles) et à l'oreille gauche (symboles x) des participants dans les quatre catégories de perte auditive (PA1 à PA4).

