

Effet du port de protecteurs auditifs et de casques de sécurité sur la perception et la localisation auditives des alarmes de recul

Véronique Vaillancourt
Chantal Laroche
Christian Giguère
Hugues Nélisse

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1067



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

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du 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

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)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-072-7
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
octobre 2019

Effet du port de protecteurs auditifs et de casques de sécurité sur la perception et la localisation auditives des alarmes de recul

Véronique Vaillancourt¹, Chantal Laroche¹
Christian Giguère¹, Hugues Nélisse²

¹ Université d'Ottawa

² IRSST

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1067



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 membres du comité de suivi qui ont soutenu le projet tout au long de son déroulement. Par leurs conseils, leurs suggestions et les échanges qu'ils ont favorisés lors des rencontres, ils ont contribué à l'aboutissement de ces travaux et à l'assurance de leurs liens concrets avec les besoins des milieux de travail. Les auteurs tiennent aussi à témoigner leur gratitude envers les personnes qui ont participé aux essais en laboratoire. Finalement, les auteurs expriment leur reconnaissance à Flora Nassrallah, de l'Université d'Ottawa, pour sa contribution aux analyses statistiques ainsi qu'à Jérôme Boutin de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), pour le développement et la mise à jour du système de localisation.

SOMMAIRE

Depuis 2012, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et l'Université d'Ottawa ont réalisé conjointement deux projets qui ont permis de cerner les limites de l'efficacité des alarmes de recul conventionnelles utilisées en milieu de travail (alarmes tonales « [bip-bip](#) ») comparativement aux alarmes à large bande (« [pshit-pshit](#) ») pour assurer la sécurité des travailleurs qui circulent près de véhicules lourds en mouvement. Les résultats de ces études ont démontré qu'en ajustant les alarmes selon les prescriptions de la norme ISO 9533, en tenant toutefois compte de toutes les sources de bruit dans l'environnement de travail et non seulement du bruit du moteur, il n'y aurait pas de contre-indication à utiliser l'alarme de recul à large bande, du moins pour les travailleurs avec audition normale et qui ne portent pas de protecteurs auditifs. Compte tenu de la popularité grandissante de l'alarme à large bande au Québec, les auteurs se sont questionnés sur l'application de leurs résultats aux milieux de travail réels dans lesquels œuvrent des travailleurs qui portent des protecteurs auditifs passifs ou actifs et des équipements de sécurité, tels que des casques.

L'objectif principal de ce troisième projet IRSST/Université d'Ottawa est d'analyser l'audibilité (seuil de détection et seuil de réaction) et la localisation des deux grands types d'alarmes de recul (conventionnelle et à large bande) chez des auditeurs normaux, pour un ensemble de situations typiques des milieux de travail, en ajoutant le port de protecteurs auditifs et de casques de sécurité. La méthodologie utilisée est similaire à celle employée dans le second projet [[Rapport R-977](#) (Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère, et Boutin, 2017)] qui mettait en scène des auditeurs normaux qui ne portaient pas de protecteurs auditifs ou de casques de sécurité. La mesure du seuil de détection vise à déterminer le niveau sonore de l'alarme le plus faible perçu dans différents bruits de fond. La mesure du seuil de réaction vise, quant à elle, à déterminer le niveau sonore de l'alarme en présence des mêmes bruits, qui provoquerait une réaction du travailleur 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 localisation sonore, elle vise à mesurer les capacités d'identification correcte de la provenance de l'alarme ainsi que les types de confusions (erreurs avant-arrière et gauche-droite).

Les principaux résultats issus de cette étude devraient permettre de mieux encadrer l'utilisation des alarmes de recul et des protecteurs auditifs en milieu de travail bruyant, en tenant compte toutefois des limites exposées dans ce rapport. Selon leurs auteurs, voici les éléments important à retenir :

- Tout comme lors des études précédentes financées par l'IRSST, l'alarme à large bande s'est avérée supérieure à l'alarme tonale à divers égards. Elle est plus facile à localiser et engendre une réaction de retrait à des rapports S/B (Signal/Bruit) inférieurs, avec ou sans protecteurs.
- Les seuils de réaction sont moins sensibles aux caractéristiques du bruit (variations spectrales et temporelles) que les seuils de détection. Cela présente l'avantage de pouvoir utiliser une méthode d'ajustement de l'alarme basée uniquement sur le niveau global du bruit, comme le préconise la norme ISO 9533.

- Si un ajustement du niveau de l'alarme est effectué selon la norme ISO 9533, il est important de :
 - Ajouter jusqu'à 7 dB au rapport S/B de 0 dB si des protecteurs auditifs sont utilisés. Notons que cette correction n'est valable que pour des individus avec audition normale.
 - 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 sur lequel l'alarme est installée.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
2.1 Audibilité des alarmes de recul et effet des protecteurs auditifs	3
2.2 Localisation sonore des alarmes de recul et effet des protecteurs auditifs	5
2.3 Effet des casques de protection	6
2.4 Effet d'une tâche connexe.....	8
3. OBJECTIFS	9
3.1 Objectif principal	9
3.2 Objectifs spécifiques	9
4. VOLET 1 – EFFET DES PROTECTEURS AUDITIFS PASSIFS ET À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LES SEUILS DE DÉTECTION ET DE RÉACTION DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE	11
4.1 Méthodologie	11
4.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruits	11
4.1.2 Protecteurs auditifs.....	14
4.1.3 Participants	15
4.1.4 Procédures expérimentales	16
4.2 Résultats.....	17
4.2.1 Protecteurs auditifs passifs.....	17
4.2.2 Protecteurs auditifs à rétablissement de son	22
4.3 Discussion Volet 1 – Effet des protecteurs auditifs sur les seuils de détection et de réaction	32
4.3.1 Pistes d'explication des résultats obtenus	32
4.3.2 Comparaison des résultats aux normes d'ajustement des dispositifs d'alarmes de recul	33
4.3.3 Autres considérations	35
5. VOLET 2 – EFFET DES PROTECTEURS AUDITIFS PASSIFS ET À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LA LOCALISATION AUDITIVE DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE	37

5.1	Méthodologie	37
5.1.1	Stimuli sonores – alarmes et bruit.....	37
5.1.2	Participants	38
5.1.3	Procédures expérimentales	38
5.2	Résultats – Pourcentage de réussite	40
5.2.1	Protecteurs passifs.....	40
5.2.2	Protecteurs à rétablissement de son	48
5.3	Résultats – Pourcentage de confusions avant/arrière (A/A) et gauche/droite (G/D).....	55
5.3.1	Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs passifs.....	56
5.3.2	Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs à rétablissement de son	56
5.4	Discussion Volet 2 – Effet des protecteurs auditifs sur la localisation sonore	57
5.4.1	Résultats principaux	57
5.4.2	Limites de l'étude	58
6.	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	61
7.	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	63
7.1	Portée et limites des résultats	64
	RÉFÉRENCES	65
	ANNEXE A : CONSIGNES POUR LES SEUILS DE DÉTECTION ET SEUILS DE RÉACTION	69
	ANNEXE B : RÉSULTATS – POURCENTAGE DE CONFUSION AVANT/ARRIÈRE (A/A)	71
B.I	Deuxième niveau Sous-titre Style « Titre 2 Annexe »	71
B.I.I	Groupe 1 – bouchons EAR Ultrafit.....	71
B.I.II	Groupe 2 – coquilles 3M PELTOR Optime 95	72
B.I.III	Groupe 3 – double protection	74
B.I.IV	Différences entre les groupes pour les protecteurs auditifs passifs.....	76
B.I.V	Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs passifs.....	78
B.II	Protecteurs à rétablissement de son.....	79
B.II.I	Groupe 1 – bouchons 3M PELTOR Tactical	79
B.II.II	Groupe 2 – coquilles 3M PELTOR Protac III.....	81
B.II.III	Groupe 3 – coquilles Howard Leight IMPACT H.....	82
B.II.IV	Différences entre les groupes pour les protecteurs auditifs à rétablissement de son	83
B.II.V	Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs à rétablissement de son	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Gain des trois protecteurs auditifs à rétablissement de son à deux différentes positions du contrôle du volume	15
Tableau 2.	Moyennes et écarts-types pour les seuils de détection et de réaction pour l'alarme tonale (haut) et l'alarme à large bande (bas) avec/sans les coquilles passives	19
Tableau 3.	Moyennes et écarts-types pour les seuils de détection et de réaction pour l'alarme tonale (haut) et l'alarme à large bande (bas) avec/sans les protecteurs à rétablissement de son	24
Tableau 4.	Conditions d'écoute pour les deux séries d'essais en localisation sonore	40
Tableau 5.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port de bouchons passifs	42
Tableau 6.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port de coquilles passives	43
Tableau 7.	Différences statistiquement significatives entre les conditions d'écoute dans le pourcentage de réussite lors du port de double protection (bouchons passifs + coquilles passives)	46
Tableau 8.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug	50
Tableau 9.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port des coquilles à rétablissement de son 3M Tactical Protac III	52
Tableau 10.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H	53
Tableau 11.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d'écoute lors du port de bouchons passifs	72
Tableau 12.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d'écoute lors du port de coquilles passives	74
Tableau 13.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d'écoute lors du port d'une double protection (bouchons passifs + coquilles passives)	75
Tableau 14.	Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d'écoute lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Contenu spectral des alarmes tonale (GROTE 73030) et à large bande (BBS-107).....	12
Figure 2.	Trace temporelle des deux alarmes sur une période de trois secondes.	12
Figure 3.	Analyse spectrale en bandes de tiers d'octave des six bruits (L_{Zeq} en fonction de la fréquence sur la durée totale du bruit).....	13
Figure 4.	Caractéristiques temporelles des six bruits par segment de 25 ms ($L_{Aeq\ 25ms}$).	13
Figure 5.	Protecteurs utilisés dans le cadre de l'étude.	14
Figure 6.	Seuils moyens de détection et de réaction (exprimés en dB S/B ¹) lors du port ou non des coquilles 3M Peltor Optime 95 (de type passif), dans six bruits d'environnement de travail	18
Figure 7.	Seuils moyens de détection et de réaction (exprimés en dB S/B ¹) lors du port ou non des bouchons à rétablissement sonore 3M PELTOR Tactical, dans trois bruits d'environnement de travail.	22
Figure 8.	Seuils moyens de détection et de réaction (exprimés en dB S/B ¹) lors du port ou non des coquilles à rétablissement sonore 3M PELTOR Protac III, dans trois bruits d'environnement de travail.	23
Figure 9.	Positionnement des haut-parleurs, du participant et du trépied (tâche connexe) pour les épreuves de localisation.....	39
Figure 10.	Tâche connexe accomplie par les participants – <i>Tower of London Test</i>	39
Figure 11.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de bouchons passifs.....	41
Figure 12.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de coquilles passives.	43
Figure 13.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port d'une double protection (bouchons passifs + coquilles passives).	45
Figure 14.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons passifs, coquilles passives et double protection passive) sans casque de sécurité.	47
Figure 15.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug.	49
Figure 16.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son 3M Tactical Protac III.....	51
Figure 17.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H.....	53

Figure 18.	Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles à rétablissement de sons) dans la condition d'écoute avec les protecteurs auditifs en mode OFF.	54
Figure 19.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de bouchons passifs.	72
Figure 20.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de coquilles passives.	73
Figure 21.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port d'une double protection (bouchons passifs + coquilles passives).	75
Figure 22.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons passifs, coquilles passives et double protection passive) sans casque de sécurité.	77
Figure 23.	Pourcentages de confusion gauche/droit moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons passifs, coquilles passives et double protection passive) sans casque de sécurité.	78
Figure 24.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug.	80
Figure 25.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son 3M Tactical Protac III.	81
Figure 26.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H.	82
Figure 27.	Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles à rétablissement de son) dans la condition d'écoute avec les protecteurs auditifs en mode OFF.	83
Figure 28.	Pourcentages de confusion gauche/droit moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles à rétablissement de son) dans la condition d'écoute avec les protecteurs auditifs en mode OFF.	84

1. INTRODUCTION

Malgré l'utilisation d'alarmes de recul sur la plupart des véhicules lourds, des accidents parfois mortels sont recensés chaque année tant au Québec qu'un peu partout dans le monde (Blouin, 2005; Direction des communications et des relations publiques, Commission de la santé et de la sécurité du travail, 2011; Health and Safety Executive, 2001; Laroche, Ross, Lefebvre et Larocque, 1995; Murray, Mills et Moore, 1998; NIOSH, 2004). Ce constat s'applique à plusieurs domaines d'activités (p. ex. : construction, transport, mines, municipalités). Une meilleure conception des plans de circulation et une réduction, voire l'élimination, des manœuvres de recul est préconisée afin de réduire le nombre de tels accidents. Toutefois, l'utilisation d'alarmes sonores de recul demeure obligatoire sur la plupart des véhicules lourds et reste un moyen largement utilisé pour prévenir et alerter toutes les personnes œuvrant à proximité des véhicules.

Des études antérieures ont montré les limites d'efficacité des alarmes conventionnellement utilisées en milieu de travail (alarmes tonales « [bip-bip](#) ») comparativement aux alarmes large bande (« [pshit-pshit](#) ») pour minimiser le risque pour la sécurité des travailleurs (Laroche *et al.*, 1995; Nélisse *et al.*, 2017; Vaillancourt *et al.*, 2012). Entre autres, son patron de propagation derrière les véhicules lourds est moins uniforme et la capacité à la localiser dans la bonne direction est réduite. Laroche *et al.*, 1995 ont observé des fluctuations significatives du niveau de pression sonore de l'alarme à des distances de moins de 2 mètres du véhicule, pouvant atteindre jusqu'à 15 dB sur l'espace de quelques centimètres.

Un premier projet IRSST/Université d'Ottawa [[Rapport R-763](#) (Vaillancourt *et al.*, 2012)] visait à comparer la technologie émergente des alarmes à large bande aux alarmes conventionnelles sur le plan de la sécurité des travailleurs. Ce projet a été réalisé en réponse aux affirmations du manufacturier selon lesquelles ce type d'alarme était plus sécuritaire et causait moins de nuisance environnementale que l'alarme tonale conventionnelle. L'ensemble des résultats, tant sur le terrain qu'en laboratoire, a permis de vérifier que l'alarme à large bande est conforme à la norme SAE J994 (SAE, 2009), qui est la plus utilisée pour la qualification des alarmes installées sur des véhicules lourds, et n'a pas mis en évidence de contre-indication à utiliser l'alarme à large bande en matière de sécurité des travailleurs. Il a par ailleurs été démontré que l'alarme à large bande permet d'obtenir un champ sonore beaucoup plus homogène derrière les véhicules et est plus facile à localiser dans l'espace, particulièrement dans la dimension avant/arrière. On y conclut que certains avantages que pourrait procurer l'alarme tonale (meilleure détection dans le bruit et degré d'urgence légèrement supérieur dans certaines situations d'écoute) ne permettent fort probablement pas de contrer l'effet néfaste des fortes variations spatiales du niveau sonore obtenues avec cette alarme sur de courtes distances (de l'ordre de 15-20 dB).

Un second projet IRSST/Université d'Ottawa [[Rapport R-977](#) (Nélisse *et al.*, 2017)] a confirmé la présence d'un champ sonore beaucoup plus homogène derrière les véhicules lors de l'utilisation de l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale, même dans les cas où l'installation de l'alarme n'est pas optimale. La supériorité en localisation sonore de l'alarme à large bande a également été confirmée pour des auditeurs normaux. En effet, les résultats ont démontré que l'alarme à large bande est plus facile à localiser dans l'espace, même lorsque le récepteur doit détecter 2 alarmes émises en même temps ou qu'il est occupé à effectuer une tâche principale. Il a aussi été démontré que les seuils de retrait pour l'alarme à large bande,

soit le niveau sonore à partir duquel les gens ont le réflexe de se retirer de la zone de danger, sont en moyenne 2 dB plus faibles que le niveau de bruit et ce, pour 12 bruits représentatifs des milieux de travail. Dans ce projet, seule la portion active « on » de l'alarme a été considérée, ce qui équivaut à un rapport signal-sur-bruit (S/B) de -5 dB lorsque le niveau sonore est calculé sur l'ensemble du signal¹. Ces résultats, obtenus chez des participants avec audition normale, sont conformes à ce qui est préconisé par la norme ISO 9533 (ISO, 2010). Selon cette norme, le niveau sonore de l'alarme, calculé sur la durée totale du signal (portions « on » et « off »), doit être au moins égal au niveau du bruit du moteur pour assurer la sécurité des travailleurs. Les résultats obtenus dans ce projet ont permis de formuler quelques recommandations en vue d'une utilisation plus sécuritaire ou, à tout le moins, plus optimale des alarmes de recul. Les résultats suggèrent, entre autres, qu'en ajustant les alarmes selon les prescriptions de la norme ISO 9533, il n'y aurait pas de contre-indication à utiliser l'alarme de recul à large bande, du moins pour les travailleurs avec audition normale qui ne portent pas de protecteurs auditifs. Il faudrait toutefois tenir compte de toutes les sources de bruit dans l'environnement de travail et non seulement le bruit du moteur. Plus spécifiquement, les recommandations suivantes ont été formulées : 1) les alarmes devraient être placées dans une position optimale, soit à l'arrière du camion, être visible directement par un travailleur se trouvant dans la zone de danger, à une hauteur entre 1 et 2 m; 2) la norme ISO 9533 devrait être utilisée pour l'ajustement du niveau sonore des alarmes de recul, en incluant toutes les sources de bruit autour du véhicule lors de la mesure du bruit; 3) une vitesse maximale de recul de 12,6 km/h devrait être observée afin de garantir le bon rapport S/B prescrit par la norme ISO 9533 et d'assurer un temps de réaction minimal de 2 secondes (conforme à SAE J1741); 4) l'usage des alarmes à large bande devrait être préconisé dans les situations au cours desquelles plusieurs véhicules exécutent simultanément des manœuvres de recul et pour minimiser les risques associés à une mauvaise localisation auditive.

Compte tenu de la popularité grandissante de l'alarme à large bande au Québec et des résultats obtenus jusqu'à maintenant, il est justifié de se questionner sur l'application de ses résultats aux milieux de travail réels dans lesquels des travailleurs portent des protecteurs auditifs passifs ou actifs et des équipements de sécurité, tels que des casques. Les protecteurs passifs n'ont aucune composante électronique et atténuent normalement davantage le bruit en hautes fréquences qu'en basses fréquences. Les protecteurs actifs sont ceux qui utilisent des moyens électroniques pour améliorer ou réguler la réduction du bruit ou d'autres fonctions (CSA, 2014).

¹ Dans le rapport précédent soumis à l'IRSST [Rapport R-977 (Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2017)], le niveau sonore de l'alarme n'était calculé que sur la portion active (« on ») du signal. Dans le présent rapport, le niveau sonore de l'alarme (ou son rapport signal/bruit) est calculé sur la durée totale du signal, incluant les portions « on » et « off », afin de faciliter les comparaisons avec la norme ISO 9533. L'intégration du niveau sonore sur la durée totale résulte en un niveau ou un rapport S/B de 3 dB inférieur à celui calculé sur la portion « on » seulement, étant donné la durée équivalente des portions « on » et « off ».

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les équipements de protection individuelle tels que les protecteurs auditifs (PA) et les casques de sécurité sont obligatoires dans plusieurs milieux de travail bruyant, mais leur utilisation peut engendrer des problèmes de sécurité.

2.1 Audibilité des alarmes de recul et effet des protecteurs auditifs

Les normes actuelles spécifient les caractéristiques techniques minimales des alarmes de recul (SAE J994, 2009) et fournissent des balises pour l'ajustement du niveau sonore (ISO 9533, 2010). Lors des mesures à l'arrière des véhicules lourds, des procédures de vérification doivent être déployées. Par exemple, la norme ISO 9533 stipule que les niveaux de pression sonore mesurés quand l'alarme est activée et que le moteur fonctionne à faible régime (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 ≥ 0 dB), et ce, à 7 différents points de mesure derrière le véhicule. Dans une étude portant sur deux types d'alarmes de recul installées sur un camion à benne circulant dans une mine de surface, Homer (2008) a démontré que le critère du 0 dB S/B était satisfait à tous les points de mesure à l'exception d'un seul pour l'alarme tonale, comparativement à seulement trois pour l'alarme à large bande. De plus, le son de l'alarme tonale s'étendait sur une zone approximativement 45 % plus grande que celle de l'alarme à large bande dans un environnement très bruyant. Dans une étude plus récente, Popoff-Asotoff *et al.*, 2012 ont mesuré, selon les recommandations de la norme ISO 9533, les niveaux sonores générés par des alarmes tonales et alarmes autoajustables à large bande derrière plusieurs types de véhicules (p. ex. : camion à incendie, chargeuse, niveleuse, camion à benne). Les résultats démontrent qu'une proportion importante des alarmes tonales ne rencontraient pas les exigences de la norme, alors que les alarmes autoajustables de type à large bande étaient satisfaisantes lorsque bien installées sur le véhicule. Notons que la norme ISO 9533 ne prend que le bruit du camion en considération pour l'ajustement du niveau de l'alarme. Le bruit du milieu de travail (p. ex. : chantier de construction, mine) peut aussi affecter l'audibilité de l'alarme ou atténuer le degré d'urgence ressenti par les travailleurs. Pour plus de détails sur les paramètres des alarmes et leur évaluation, le lecteur est invité à consulter le [Rapport R-763](#) (Vaillancourt *et al.*, 2012).

Par ailleurs, des critères généraux sur l'audibilité et les procédures de mesures afin d'assurer la reconnaissance adéquate des signaux auditifs de danger ont été normalisés (ISO, 2003) ou proposés par plusieurs auteurs (Robinson et Casali, 2003; Zheng *et al.*, 2007). Enfin, selon certains auteurs (Giguère, Laroche, Osman et Zheng, 2008; Tran Quoc et Hétu, 1996), les signaux auditifs de danger doivent être ajustés à des niveaux de 12 à 25 dB au-dessus du seuil masqué, afin d'assurer une utilisation optimale. Des niveaux inférieurs à ces derniers peuvent ne pas attirer l'attention, alors que des niveaux plus élevés pourraient induire des réactions de sursaut, et peuvent engendrer une nuisance importante. Cependant, il n'existe pas de lignes directrices universellement appliquées sur le terrain afin d'assurer que les alarmes de recul soient clairement audibles et qu'elles provoquent une réaction suffisante, sans être trop intenses.

Plusieurs études ont porté sur la détection et l'audibilité des alarmes de recul [voir V. Vaillancourt *et al.*, 2012, 2013, pour une synthèse]. Dans une étude récente menée auprès de

jeunes adultes avec audition normale (Nélisse *et al.*, 2017), les seuils masqués de deux alarmes de recul distinctes (tonal et à large bande), présentées dans 12 bruits représentatifs des milieux de travail, ont été mesurés. Les seuils de détection moyens, exprimés en S/B1, variaient de -15,8 à -27 dB S/B pour l'alarme tonale et de -13,5 à -24 dB S/B pour l'alarme à large bande. Ces résultats étaient comparables à ceux obtenus par Vaillancourt *et al.*, 2012, 2013 pour une série de quatre bruits. Il est intéressant de mentionner que Dolan et Rainey (2005) ont obtenu des seuils masqués similaires (-10,8 à -28 dB S/B) pour la perception de sifflets de train dans 12 conditions de bruit typiques de l'intérieur d'un véhicule. Il semble donc que cette étendue de seuils de détection est commune à différents types d'alarmes. Même lorsqu'ils utilisent des protecteurs auditifs, les individus avec audition normale peuvent détecter les alarmes à des S/B similaires (Vaillancourt *et al.*, 2013). Casali et Wright (1995) ont mesuré les seuils de détection d'une alarme de recul conventionnelle dans trois différents niveaux de bruit rose (75, 85 et dBA) chez 12 auditeurs normaux lors du port de deux protecteurs passifs et de deux protecteurs auditifs à rétablissement de son de type coquilles. Une analyse statistique n'a pas révélé d'effet significatif du type de protecteur auditif, les résultats ne démontrant ainsi aucun avantage ou désavantage des protecteurs à rétablissement de son comparativement aux protecteurs passifs pour la détection de l'alarme de recul. Sur l'ensemble des conditions et des bruits, les seuils de détection masqués moyens étaient d'environ -12 à -15 dB.

Au lieu de déterminer des seuils de détection, Lancaster *et al.* (2007) ont mesuré la distance à laquelle des individus avec audition normale pouvaient détecter une alarme de recul conventionnelle, lors du port de protecteurs auditifs passifs de type coquilles. Sur un terrain extérieur, les individus devaient s'éloigner du camion jusqu'à ce qu'ils ne perçoivent plus l'alarme et, à partir d'un point plus loin, s'approcher du camion jusqu'à ce que l'alarme soit de nouveau détectée. La distance moyenne de détection fut ainsi déterminée et combinée ensuite avec la vitesse maximale du camion, la largeur maximale du type de camion, le temps normalement requis pour détecter et reconnaître le signal, et la vitesse moyenne de marche pour les humains. Ceci a permis de calculer la distance minimale requise entre le camion et le travailleur pour permettre à ce dernier de se retirer de la zone de danger. Le même type d'expérimentation a été repris dans une étude plus récente (K. Alali et Casali, 2012) avec différents types de protecteurs. Il en ressort que l'utilisation de protecteurs auditifs peut réduire la distance à laquelle les individus peuvent détecter une alarme de recul. Il est toutefois bon de noter que ces études ont été menées dans un environnement où le bruit de fond, autre que celui du véhicule et de l'alarme, était très faible, ce qui n'est pas nécessairement représentatif de plusieurs milieux de travail où les alarmes de recul sont utilisées.

Alors que les protecteurs auditifs ne semblent pas généralement interférer avec la détection des alarmes de recul (et peuvent parfois même l'améliorer) chez les auditeurs normaux (Casali, Robinson, Dabney, et Gauger, 2004; Casali et Wright, 1995; Lovejoy, 2008; Vaillancourt *et al.*, 2013), leur impact peut être très différent à des niveaux sonores supra-seuils. Par exemple, Vaillancourt *et al.*, 2013 ont obtenu des évaluations réduites du degré d'urgence à des niveaux supra-seuils, lorsqu'il y avait port de protecteurs auditifs comparativement à l'absence de protecteurs.

Il est important de vérifier si, avec des protecteurs auditifs, l'effet marqué du type de bruit sur le seuil de détection masqué est aussi démontré aux niveaux supra-seuils, c.-à-d. à des niveaux auxquels les alarmes sont censées être entendues et attirer l'attention. En effet, dans (Nélisse

et al., 2017), l'effet du type de bruit sur les seuils de détection était plus important que sur les seuils de réaction, sans protection pour les 12 bruits étudiés. Dans un tel cas, les caractéristiques spectrales et le profil d'atténuation du protecteur auditif devraient être pris en compte pour l'ajustement du niveau de l'alarme, tel que précisé dans certaines normes (p.ex. ISO 7731). Par ailleurs, si les différences entre les bruits sont moins marquées aux niveaux supra-seuils, cela pourrait signifier qu'un paramètre plus global serait suffisant (p. ex. ISO 9533).

2.2 Localisation sonore des alarmes de recul et effet des protecteurs auditifs

La localisation de sources sonores a été largement étudiée. Plusieurs aspects théoriques ont été présentés dans les rapports précédents [[Rapport R-763](#) (Vaillancourt *et al.*, 2012) et [Rapport R-977](#) (Nélisse *et al.*, 2017)]. Dans le présent rapport, seules les nouvelles études portant spécifiquement sur la localisation des alarmes de recul sont abordées. En fait, peu d'études ont porté spécifiquement sur les alarmes de recul [voir Vaillancourt *et al.*, 2012, 2013 pour une synthèse]. Mlynski et Kozlowski (2017) ont évalué la capacité de 20 individus avec audition normale à identifier correctement la direction de l'avertisseur sonore d'un camion industriel en présence d'un bruit extrait du milieu de travail lors du port de protecteurs auditifs passifs de type coquilles. Pour un ensemble de haut-parleurs entourant le sujet, placés à la hauteur de la tête et au-dessus de celle-ci, une bonne réponse était accordée si le haut-parleur indiqué par l'individu se situait à $\leq 45^\circ$ du haut-parleur ayant émis le signal. Le pourcentage d'identification correcte était limité à 20 % pour un signal directement derrière (180°) et à 30 % pour un signal directement devant (0°), alors que le pourcentage de réussite était significativement plus élevé pour les sources venant du côté ($67,5-112,5^\circ$ et $247,5-292,5^\circ$), soit 80 à 98 %. En réduisant le niveau du bruit, le pourcentage de réussite a également augmenté de façon significative uniquement pour la source venant directement de l'avant (de 37 %) et pour celle venant de 45° (de 20 %). Les résultats de cette étude suggèrent que la direction d'un camion industriel est beaucoup plus difficile à déterminer lorsque celui-ci est directement devant ou derrière le travailleur qui porte des coquilles passives dans un milieu de travail bruyant, et plus facile lorsqu'il provient de côté.

Dans une récente étude, Nélisse *et al.* (2017) ont étudié la localisation sonore de deux alarmes de recul (tonal et à large bande) alors que les participants devaient simultanément réaliser une tâche sur une tablette numérique et identifier la provenance d'une alarme de courte durée émanant d'une sphère de huit haut-parleurs disposés sur 360 degrés. Les mouvements de tête et du haut du corps étaient permis. La performance globale avec laquelle l'ensemble des participants ont identifié correctement la source, moyennée à travers les conditions d'écoute (avec et sans tâches), était pratiquement le double pour l'alarme à large bande (83 %) comparativement à l'alarme tonale (42 %). Par ailleurs, on notait plus de confusions avant/arrière pour l'alarme tonale (24 % par rapport à 11 % pour l'alarme à large bande). L'ajout d'une tâche connexe ne semble pas avoir eu d'effet significatif sur la localisation dans cette étude.

Les travailleurs œuvrant en milieu bruyant doivent souvent porter des équipements de protection, incluant des protecteurs auditifs et des casques de sécurité. Alors que les protecteurs passifs sont les plus fréquemment utilisés, il a été démontré qu'ils engendraient une réduction des performances de localisation comparativement à l'oreille nue (S. M. Abel et Armstrong, 1993; S. M. Abel et Hay, 1996; Atherley et Noble, 1970; Berger et Casali, 1997;

Bolia, D'Angelo, Mishler et Morris, 2001; McKinley, 2000; Noble, 1981; Noble, Murray et Waugh, 1990; Noble et Russell, 1972; Russell, 1977; Simpson, Bolia, McKinley et Brungart, 2005; Takimoto, Nishino, Itou et Takeda, 2007 ; Vaillancourt *et al.*, 2013; Vause et Grantham, 1999), principalement en augmentant le nombre de confusions avant/arrière. De plus, les protecteurs de type coquilles sont généralement moins performants que les bouchons pour la localisation (S. M. Abel et Hay, 1996; Russell, 1976; Suter, 1989; Vaillancourt *et al.*, 2013).

Quelques études ont précisément porté sur l'effet des protecteurs auditifs sur la localisation sonore des alarmes de recul (K. A. Alali, 2011; K. A. Alali et Casali, 2011; Casali et Alali, 2010; Vaillancourt *et al.*, 2013). Alali et Casali (2011) ont étudié l'effet de sept protecteurs (bouchons : deux passifs, un actif et un avec atténuation uniforme; coquilles : une passive, une active dichotique et une active diotique) sur la capacité d'auditeurs avec audition normale de localiser une alarme conventionnelle et une alarme modifiée. La durée de l'alarme était de 15 secondes et celle-ci émanait de huit haut-parleurs disposés sur 360 degrés, en présence d'un bruit de fond. En plus des sept conditions d'écoute, les auditeurs étaient appelés à identifier la provenance des alarmes dans une condition d'écoute sans protection. Les mouvements de tête étaient permis et le recul du véhicule était simulé en augmentant le niveau de l'alarme à un taux correspondant à une vitesse de 10 km/h. Seules les performances avec les coquilles diotiques se sont avérées significativement pires que les autres conditions d'écoute, incluant la condition sans protection. Ce résultat s'explique par l'absence d'indices binauraux due à l'unique microphone qui alimentait les deux coquilles. Conformément à des résultats antérieurs, la localisation a été meilleure dans le plan gauche/droite que dans celui avant/arrière. L'étude a aussi démontré un certain avantage de l'alarme modifiée (comportant des fréquences additionnelles à 400 Hz et 4000 Hz) sur l'alarme conventionnelle.

Dans l'étude de Vaillancourt *et al.* (2013), les participants devaient identifier la provenance d'alarmes de recul (tonale et à large bande) présentée pendant 3 secondes dans 12 haut-parleurs disposés également sur une demi-sphère de 180 degrés, en présence d'un bruit de 80 dBA. Trois configurations spatiales ont été étudiées : haut-parleurs à l'arrière (évaluant la localisation droite/gauche), à droite (évaluant la localisation avant/arrière) et à gauche (évaluant la localisation avant/arrière). Aucun mouvement de tête n'était permis et le mouvement de recul du véhicule était simulé en augmentant le niveau de l'alarme à un taux correspondant à une vitesse de 10 km/h. Les performances ont été mesurées sans protection, avec une coquille passive (PELTOR Optime 95) et une paire de bouchons passifs (EAR Ultrafit). Dans l'ensemble, les performances de localisation se sont avérées supérieures avec l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale, ainsi que dans la condition gauche/droite plutôt qu'avant/arrière (haut-parleurs sur le côté) pour les deux alarmes. Alors que les bouchons n'ont pas eu d'impact sur la localisation sonore, le port de coquilles s'est traduit par une augmentation du nombre de confusions avant/arrière pour les deux alarmes et du nombre de confusions gauche/droite pour l'alarme tonale.

2.3 Effet des casques de protection

En ce qui a trait au port d'un casque de sécurité, qui est très fréquent dans les milieux où circulent des véhicules lourds (p. ex. : chantiers de construction, mines, cours de triage), ses effets sur la détection ou la localisation de sources sonores ne sont pas vraiment connus. Quelques études semblent s'être intéressées au port de casques militaires. L'équipe de Scharine (Melzer, Scharine et Amrein, 2012; A. A. Scharine, 2005; A. A. Scharine, Fluitt et

Letowski, 2009; A. A. Scharine, MacDonald, Binseel et Mermagen, 2007; Angélique A., Scharine et Letowski, 2013) s'est particulièrement intéressée à cette problématique. Scharine *et al.* (2007) ont comparé les capacités de localisation sonore sans casque, avec celles mesurées lors du port d'un casque ne couvrant pas les oreilles, d'un casque couvrant partiellement les oreilles et d'un casque couvrant complètement les oreilles. Les résultats se sont avérés similaires pour la condition sans protection et pour le casque ne recouvrant pas les oreilles, alors que la capacité de localisation sonore s'est dégradée en fonction du degré de recouvrement des oreilles. Scharine et Letowski (2013) ont démontré que l'atténuation offerte par différents casques militaires varie en fonction de la fréquence du signal, de son angle d'incidence et de la forme du casque. Quoique l'atténuation moyenne des casques ne dépassait guère 1,5 dB, les modifications spectrales occasionnées par le port des différents casques pouvaient dégrader significativement la localisation sonore, avec une réduction des capacités de localisation sonore d'autant plus importante pour les casques qui recouvrent complètement les oreilles. Selon ces travaux, il semblerait que les casques militaires peuvent diminuer ou augmenter le seuil de détection d'un signal sonore; cet effet étant généralement faible, mais plus prononcé sur les hautes fréquences. D'un point de vue pratique, le port d'un casque militaire aurait donc peu d'effets sur la détection sonore. Par contre, en recouvrant partiellement ou complètement les oreilles, les casques militaires modifient les indices spectraux et ont donc un impact significatif sur la localisation sonore, en augmentant le nombre de confusions avant/arrière.

Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres équipes de recherche. Ainsi, (Abel *et al.*, 2009) ont investigué l'effet d'un bouchon muni d'un système de communication avancé, jumelé à des casques militaires ayant des degrés variés de couverture des oreilles, sur les capacités de localisation de haut-parleurs situés dans le plan horizontal. De la condition couverture complète des oreilles à la condition sans casque, les performances sont passées de 80 à 94 % sans protecteurs auditifs et de 78 à 83 % avec le bouchon actif. L'augmentation de la couverture des oreilles par le casque se traduit par une diminution progressive de la performance en localisation auditive, surtout en augmentant les erreurs avant/arrière. De tels résultats ont été attribués à la perte progressive des indices spectraux de hautes fréquences (indices associés au pavillon) qui sont essentiels pour discriminer les sources provenant de l'avant et de l'arrière. Vause et Grantham (1999) ont évalué les capacités de localisation dans les hémisphères frontal et latéral lors du port d'un casque militaire qui recouvrait partiellement les oreilles, porté seul ou avec deux types de bouchons passifs. Le casque porté seul n'a pas eu d'impact significatif sur la localisation comparativement à la condition sans casque et sans bouchons alors que le port du casque avec les bouchons a fait augmenter significativement le nombre des erreurs de localisation, principalement les confusions avant/arrière.

Les casques de sécurité qui sont portés par les travailleurs dans des contextes non militaires n'ont pas nécessairement la même forme ou le même degré de recouvrement des oreilles que les casques militaires. On peut toutefois s'interroger sur leur effet compte tenu qu'ils sont en plastique dur et que le rebord de ces casques est souvent à proximité des oreilles. Les casques de sécurité pourraient modifier le champ sonore au point de compromettre la localisation sonore, avec ou sans protecteurs auditifs.

2.4 Effet d'une tâche connexe

Les travailleurs doivent souvent exécuter plusieurs tâches dans leur milieu tout en demeurant vigilants devant les sources potentielles de danger (telles que les véhicules en mouvement). Dans ces conditions, ils ne peuvent pas nécessairement diriger toute leur attention vers la perception, l'identification, la reconnaissance et la localisation des alarmes de recul. Dans les années 70, Wilkins et Martin (1978) ont démontré un effet néfaste sur la perception des avertisseurs sonores de danger lorsque l'attention était sur une tâche. Seules quelques études ont porté sur l'effet d'une tâche connexe sur la capacité de localisation des sons, et les résultats ne sont pas toujours convergents. Une tâche cognitive a eu un effet perturbateur sur la localisation d'une bouffée tonale de 100 msec dans l'étude de Merat et Groeger (2003). Par contre, Nélisse *et al.* (2017) n'ont pas trouvé d'effet d'une tâche sur ordinateur sur les capacités de localisation de deux types d'alarmes de recul chez des individus avec audition normale qui ne portaient pas de protecteurs auditifs.

Une étude récente menée par Edworthy *et al.* (2018) a exploré l'effet de la charge de travail sur la capacité de localiser huit différents types d'alarmes sonores médicales. Les participants devaient identifier la provenance du signal sonore, d'une durée de 2-3 secondes, parmi huit haut-parleurs formant un cercle autour d'eux, et ce, dans six conditions d'écoute variant en ce qui a trait à la charge de travail : 1) sans bruit ni tâche connexe, 2) avec bruit typique de l'unité des soins intensifs, 3) sans bruit avec tâche de lecture (contrôle), 4) sans bruit et avec tâche nécessitant des mathématiques, 5) avec bruit et tâche de lecture, 6) avec bruit et tâche nécessitant des mathématiques. Les résultats démontrent qu'en augmentant la charge de travail, la performance en localisation sonore diminue. En effet, dans les conditions d'écoute les plus difficiles (bruit et tâche de lecture ou de mathématiques) le taux d'erreur s'élève à 1 sur 4 présentations comparativement à seulement 1 sur 10 présentations dans la condition contrôle.

Il semble donc que l'effet d'une tâche connexe sur la localisation sonore dépend de la charge de travail qui lui est associée. Il y a également évidence dans la littérature scientifique que la présence de distracteurs sonores peut nuire à la localisation sonore d'un stimulus d'intérêt (May et Walker, 2017). En ce qui concerne l'effet de la charge perceptuelle, les résultats d'une revue récente par (Murphy *et al.*, 2017) ne sont pas concluants et militent en faveur de recherches futures.

3. OBJECTIFS

3.1 Objectif principal

L'effet potentiel du port d'équipement de protection personnelle (protecteurs auditifs et casque de sécurité) sur la perception des alarmes de recul a été soulevé dans l'état des connaissances. Il est donc justifié, dans ce troisième projet IRSST/Université d'Ottawa, d'analyser l'audibilité (seuil de détection et seuil de réaction) et la localisation des deux grands types d'alarmes de recul (conventionnelle et à large bande) chez des auditeurs normaux. Afin d'enrichir la littérature et de minimiser les risques d'accident lié aux alarmes de recul, un ensemble de situations typiques des milieux de travail (soit des bruits représentatifs des milieux de travail) est étudié, en ajoutant le port de protecteurs auditifs et de casques de sécurité.

3.2 Objectifs spécifiques

L'atteinte de l'objectif principal exige une réponse aux sous-objectifs suivants :

- Déterminer, en laboratoire, le rapport signal/bruit optimal permettant une audibilité adéquate pour les deux grands types d'alarmes utilisées sur le terrain lors du port de protecteurs auditifs passifs et actifs, avec ou sans le port d'un casque de sécurité.
- Évaluer en laboratoire la capacité à localiser une alarme (conventionnelle ou à large bande) tout en effectuant une autre tâche préétablie, lors du port de protecteurs passifs ou actifs, avec ou sans le port d'un casque de sécurité.

Les chercheurs anticipent que le port de protecteurs auditifs (passifs ou à rétablissement de son) n'influencera pas significativement le seuil de détection des deux types d'alarmes, mais pourrait influencer leurs seuils de retrait étant donné que ce dernier semble lié à la perception du niveau sonore (sonie). Par ailleurs, les capacités de localisation de l'alarme conventionnelle seront probablement davantage affectées comparativement à celles de l'alarme à large bande lors du port des protecteurs auditifs. Il est attendu que le port de bouchons passifs ou actifs devrait avoir un impact moins significatif sur la localisation sonore que les coquilles, car les indices fournis par le pavillon de l'oreille sont moins perturbés. Finalement, pour les protecteurs actifs de type coquilles, le microphone capte le son à une certaine distance de l'oreille externe, ce qui pourrait modifier considérablement les indices acoustiques nécessaires à la localisation.

Les chapitres qui suivent seront divisés en deux sections distinctes, la première consacrée au Volet 1 portant sur les seuils de détection et de réaction, et la seconde dédiée au Volet 2 portant sur la localisation sonore des alarmes de recul.

4. VOLET 1 – EFFET DES PROTECTEURS AUDITIFS PASSIFS ET À RÉTABLISSEMENT DE SON SUR LES SEUILS DE DÉTECTION ET DE RÉACTION DES ALARMES DE REcul TONALES ET À LARGE BANDE

Pour assurer la sécurité des travailleurs œuvrant derrière les véhicules lourds, les alarmes de recul doivent être ajustées à un rapport signal/bruit permettant non seulement aux personnes de bénéficier d'une audibilité adéquate des alarmes, mais également de susciter la réaction de se tourner en direction du camion ou de se retirer de la zone de danger suffisamment rapidement pour éviter un impact. Par ailleurs, les alarmes ne doivent pas être ajustées à des niveaux trop élevés pour ne pas causer une gêne environnementale excessive et une nuisance pour les travailleurs œuvrant autour des véhicules. Dans cette optique, un rapport signal/bruit optimal est défini dans ce projet comme la différence entre le niveau sonore de l'alarme de recul et celui du bruit de fond qui suscite une perception de danger tout juste suffisante pour entraîner la réaction de se tourner en direction du camion ou de se retirer de la zone de danger.

4.1 Méthodologie

La méthodologie utilisée est similaire à celle employée dans le second projet (Nélisse *et al.*, 2017) qui impliquait des auditeurs normaux qui ne portaient pas de protecteurs auditifs ou de casques de sécurité.

4.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruits

Le contenu spectral des deux alarmes de recul utilisées dans ce projet (alarme tonale et alarme à large bande) est illustré à la Figure 1. 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 (modèle 73030 de marque Grote) consiste principalement en un son pur de 1264 Hz et en ses harmoniques en hautes fréquences, à des niveaux beaucoup plus faibles, avec un cycle d'une durée nominale de 990 ms (« bip » de 500 ms et pause de 490 ms).

L'alarme à large bande (BBS-107 Heavy Duty de Brigade Electronics) produit de l'énergie acoustique répartie sur un plus large spectre, allant principalement de 700 à 4000 Hz, et son cycle est d'une durée nominale de 770 ms (« pschitt » de 400 ms et pause de 370 ms). Même si son spectre ne contient pas de pic clairement défini, contrairement à l'alarme tonale, l'alarme à large bande produit un niveau sonore maximal entre 700 et 2800 Hz, en conformité avec la norme SAE J994.

La Figure 2 présente la trace temporelle des deux alarmes. On y constate que, sur une période de trois secondes, on retrouve trois cycles « on-off » pour l’alarme tonale et quatre cycles « on-off » pour l’alarme à large bande.

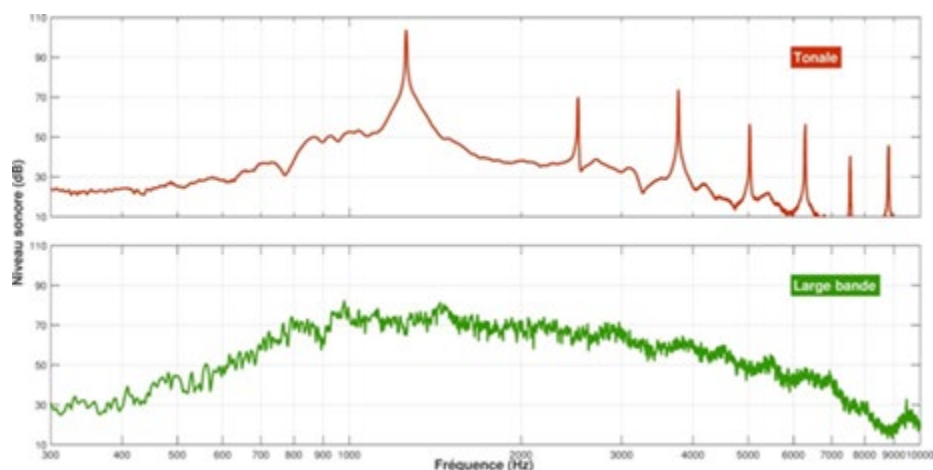


Figure 1. Contenu spectral des alarmes tonale (GROTE 73030) et à large bande (BBS-107).

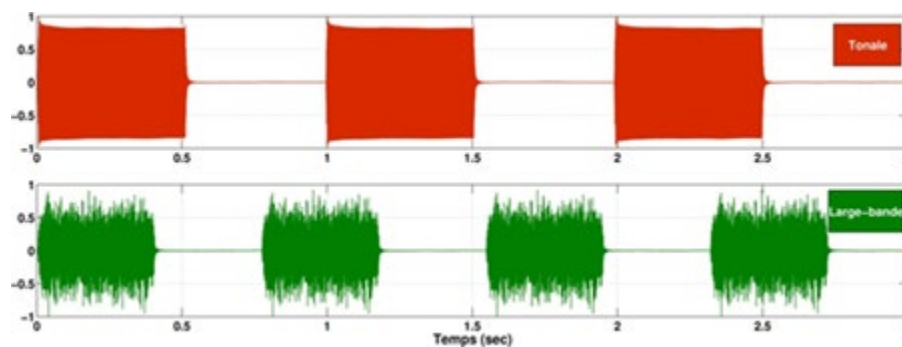


Figure 2. Trace temporelle des deux alarmes sur une période de trois secondes.

Six bruits représentatifs de divers milieux de travail dans lesquels des véhicules lourds munis d’alarmes de recul sont susceptibles de circuler ont été sélectionnés pour ce projet. Ces bruits se distinguent par leurs caractéristiques spectrales (Figure 3) et temporelles (Figure 4). Leur niveau de pression sonore a été ajusté à un niveau sonore continu équivalent de 80 dBA. Ces bruits ont été sélectionnés parmi un plus grand ensemble de douze bruits utilisés lors des deux études précédentes [[Rapport R-763](#) (Vaillancourt *et al.*, 2012) et [Rapport R-977](#) (Nélisse *et al.*, 2017)]. Dans la présente étude, six bruits ont été éliminés en raison de la redondance de leurs caractéristiques spectrales et temporelles. Cela a permis de réaliser des mesures dans un plus grand nombre de conditions expérimentales.

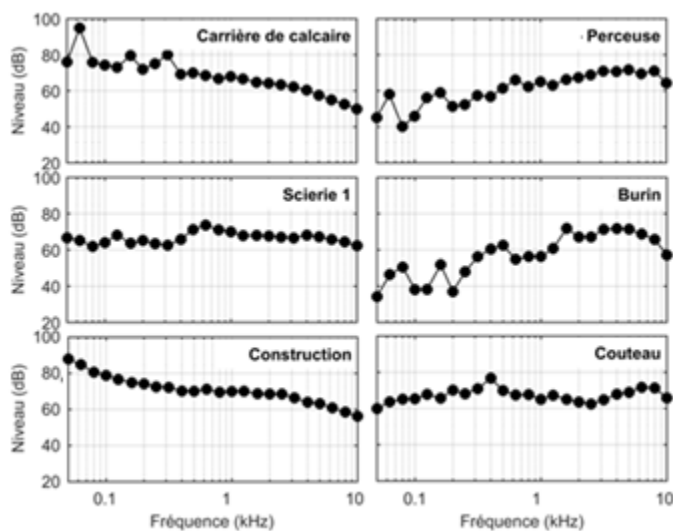


Figure 3. Analyse spectrale en bandes de tiers d'octave des six bruits (L_{Zeq} en fonction de la fréquence sur la durée totale du bruit).

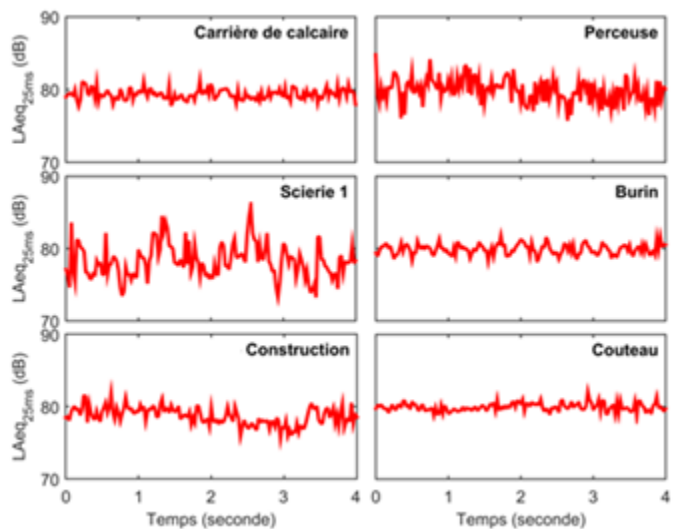


Figure 4. Caractéristiques temporelles des six bruits par segment de 25 ms ($L_{Aeq\ 25ms}$).

4.1.2 Protecteurs auditifs

Dans une première série d'essais, un protecteur auditif passif de style coquilles a été utilisé. Il s'agit du Peltor Optime 95, dont l'indice de réduction du bruit (IRB) est de 21 dB. Dans une deuxième série d'essais, deux protecteurs auditifs à rétablissement de son ont été utilisés, soit les bouchons 3M PELTOR Tactical (IRB = 23 dB) les coquilles 3M PELTOR Protac III (IRB = 26 dB). Les protecteurs utilisés dans cette étude sont illustrés à la figure 5.



Figure 5. Protecteurs utilisés dans le cadre de l'étude.

L'amplification offerte par les protecteurs auditifs à rétablissement de son a été déterminée pour différentes positions du contrôle de volume à l'aide de mesures effectuées sur un mannequin acoustique (B&K Type 4128) en présence du bruit d'une scierie présenté à 60 dBA, dans une cabine insonorisée (Eckel Industries) du Laboratoire de recherche en audition de l'Université d'Ottawa. Les résultats sont affichés au Tableau 1 pour les trois protecteurs auditifs à rétablissement de son utilisés. Les bouchons 3M PELTOR Tactical offrent uniquement deux options pour le contrôle du volume, soit le volume maximal et le volume neutre. La différence de gain notée entre ces deux positions est de 10 dB pour le bruit utilisé. Puisque les deux protecteurs auditifs à rétablissement de son de style coquilles utilisés présentent davantage de positions pour le contrôle du volume (cinq positions fixes pour le 3M PELTOR Protac III et un contrôle continu du volume pour le Howard Leight IMPACT H), il a été décidé d'utiliser le volume maximal (dénommé « position 2 ») et un volume correspondant à une réduction d'environ 10 dB par rapport au gain maximal (dénommé « position 1 ») dans ces deux cas, afin d'obtenir une différence similaire entre les positions 1 et 2 du contrôle de volume et celle notée pour le protecteur de type bouchons. Notons que les bouchons 3M PELTOR Tactical offrent la plus grande amplification, suivies des coquilles Howard Leight Impact H, alors que les coquilles 3M PELTOR Protac III offrent une légère atténuation sonore (gain négatif), même au volume maximal (Tableau 1).

Tableau 1. Gain des trois protecteurs auditifs à rétablissement de son à deux différentes positions du contrôle du volume

Protecteur	Contrôle de volume	Description du volume	Gain* (dB)
Bouchons 3M PELTOR Tactical	Position 2	Haut (maximum)	15,0
	Position 1	Normal	4,5
Coquilles 3M PELTOR Protac III	Position 2	Maximum	-2,5
	Position 1	Maximum moins 2 pas	-12,0
Coquilles Howard Leight IMPACT H	Position 2	Maximum	8,0
	Position 1	Contrôle de volume ajusté pour une baisse de niveau sonore d'environ 10 dB par rapport au volume maximal – un trait de référence a été engravé sur le protecteur	-1,5

Note :*Le gain rapporté est la différence de niveau sonore mesuré dans le simulateur d'oreille avec le protecteur à rétablissement sonore en place sur le mannequin acoustique (B&K Type 4128) et sans le protecteur dans le bruit d'une scierie à 60 dBA. Un gain positif indique que le protecteur amplifie le bruit environnemental et un gain négatif indique une réduction du niveau sonore.

4.1.3 Participants

Au total, 48 adultes (44 femmes et 4 hommes) âgés entre 22 et 43 ans ont participé aux épreuves de laboratoire visant la mesure des seuils de détection et de réaction des deux types d'alarmes de recul en présence de bruits de 80 dBA, lors du port ou non de protecteurs auditifs passifs ou à rétablissement de son. Tous les participants respectaient les critères de sélection suivants : 1) sensibilité auditive normale aux 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 cm³; volume du conduit auditif externe = 0,9 – 2,0 cm³; gradient = 51 – 114 daPa; pression = -150 à +50 daPa) (Martin et Clark, 2003).

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 H09-13-01).

Afin de s'assurer que les participants satisfaisaient aux critères de sélection, un otoscope Welch Allyn a été utilisé pour visualiser le conduit auditif externe et le tympan, alors qu'un tympanomètre GSI 38 a permis d'évaluer l'intégrité de l'oreille moyenne. Finalement, un

dépistage auditif a été effectué à l'aide d'un audiomètre portable (Interacoustics AD25) couplé à des écouteurs Telephonics TDH-39P. Lors de ce dernier test, des sons de différentes fréquences (entre 250 et 8000 Hz) ont été diffusés dans les écouteurs et les participants devaient appuyer sur un bouton-poussoir lorsqu'ils percevaient le son.

4.1.4 Procédures expérimentales

4.1.4.1 Conditions expérimentales

Dans un premier temps, les seuils de détection et de réaction de 24 participants (âge moyen = 25,7; é.t. = 4,1) ont été mesurés sans et avec le protecteur auditif passif de style coquilles, dans les six bruits décrits à la sous-section 4.1.1 (carrière de calcaire, scierie 1, perceuse, burin, couteau industriel et chantier de construction). Pour la détection et la réaction, un total de 48 seuils masqués ont été mesurés [6 bruits x 2 alarmes x 2 conditions de protection (sans et avec) x 2 répétitions de la mesure]. Ces mesures ont été effectuées à l'intérieur d'une seule session.

Dans une seconde série d'essais, les seuils de détection et de réaction de 24 participants (âge moyen = 25, 7; é.t. = 4,9) ont été mesurés sans et avec les deux protecteurs auditifs à rétablissement de son, dans un sous-ensemble de trois bruits (carrière de calcaire, scierie 1 et perceuse) et pour les conditions suivantes : 1) oreilles non couvertes avec casque de sécurité, 2) protecteur auditif éteint (mode « OFF » passif) avec casque de sécurité, 3) protecteur auditif en marche (mode « ON ») à la position 1 avec casque de sécurité, 4) protecteur auditif en fonction à la position 2 avec casque de sécurité. Pour la détection et la réaction, un total de 48 seuils masqués a été mesuré avec chacun des protecteurs auditifs [3 bruits x 2 alarmes x 4 conditions de protection x 2 répétitions de la mesure]. En augmentant le nombre de conditions de protection comparativement à la première série d'essais, il a été décidé de réduire le nombre de bruits afin de garder constant le nombre de mesures effectuées dans une même session. Les participants devaient toutefois revenir pour une deuxième session avec le second protecteur à rétablissement de son.

4.1.4.2 Méthodes

L'expérimentation a eu lieu 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 situé à 1 m de l'arrière du centre de la tête de l'individu servait à diffuser les alarmes, alors que les bruits (80 dBA) étaient émis à l'aide de 4 haut-parleurs d'angle (situés dans chaque coin de la salle) et d'un caisson de basse (voir Vaillancourt *et al.*, 2012 pour une description des équipements et de la cabine polyvalente).

À l'aide d'une tablette numérique munie d'un logiciel conçu spécialement pour cette étude, les participants devaient augmenter ou diminuer le niveau de l'alarme, par pas de 2 dB, jusqu'à ce que celle-ci soit tout juste audible (seuil de détection) ou suffisamment forte pour provoquer une attention immédiate ou un retrait hors de la zone de danger (seuil de réaction). Ces deux mesures sont exprimées en dBA par rapport au niveau de bruit, ou dB S/B¹. Lors de ces tâches, le participant était invité à s'imaginer dans un milieu de travail bruyant. Pour le seuil de détection, le participant était avisé d'ajuster l'alarme au plus bas niveau qui soit tout juste perceptible (entendu). Pour le seuil de réaction, le participant était avisé d'ajuster l'alarme au niveau à partir

duquel l'alarme évoquerait une sensation d'urgence suffisante pour qu'il réagisse en se retournant vers le camion ou en se déplaçant en dehors de la trajectoire du camion qui s'approche (la zone de danger). Les consignes données au participant sont présentées à l'Annexe A.

À partir d'un niveau de présentation initial supraliminaire, soit 77 dBA ou -3 dB S/B, le niveau de l'alarme était réduit par pas de 2 dB jusqu'à des niveaux infraliminaires (inaudibles) et ensuite augmenté pour atteindre le seuil masqué. Cette méthode adaptative d'ajustement a été répétée à plusieurs reprises jusqu'à ce que le participant soit confiant que sa 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 (R2009)].

Une approche similaire a été utilisée pour la mesure des seuils de réaction, sauf que le niveau de présentation initial était de 62 dBA (-18 dB S/B) et le critère de réponse était celui d'un niveau sonore suffisamment élevé pour provoquer une réaction qui, sur le terrain, consisterait à se tourner vers le véhicule ou à se déplacer hors de la zone de danger. Une familiarisation avec les alarmes, les bruits et la méthode de mesure du seuil a précédé l'expérimentation. Les mesures ont été répétées deux fois dans chacune des conditions expérimentales et la valeur moyenne des deux présentations a été retenue comme seuil masqué.

4.2 Résultats

4.2.1 *Protecteurs auditifs passifs*

4.2.1.1 Résultats moyens

La Figure 6 présente les seuils de détection et de réaction moyennés sur l'ensemble des participants et exprimés en rapport S/B, dans les six bruits, pour l'alarme tonale (panneau de gauche) et l'alarme à large bande (panneau de droite). Les moyennes et les écarts-types obtenus pour les deux types d'alarme sont présentés au Tableau 2, afin d'apprécier l'étendue des résultats ainsi que la variabilité intersujets.

Des analyses statistiques ont été effectuées afin de vérifier la présence d'effets principaux et d'interactions entre les différents facteurs intrasujets (type d'alarme, type de bruit et condition de protection).

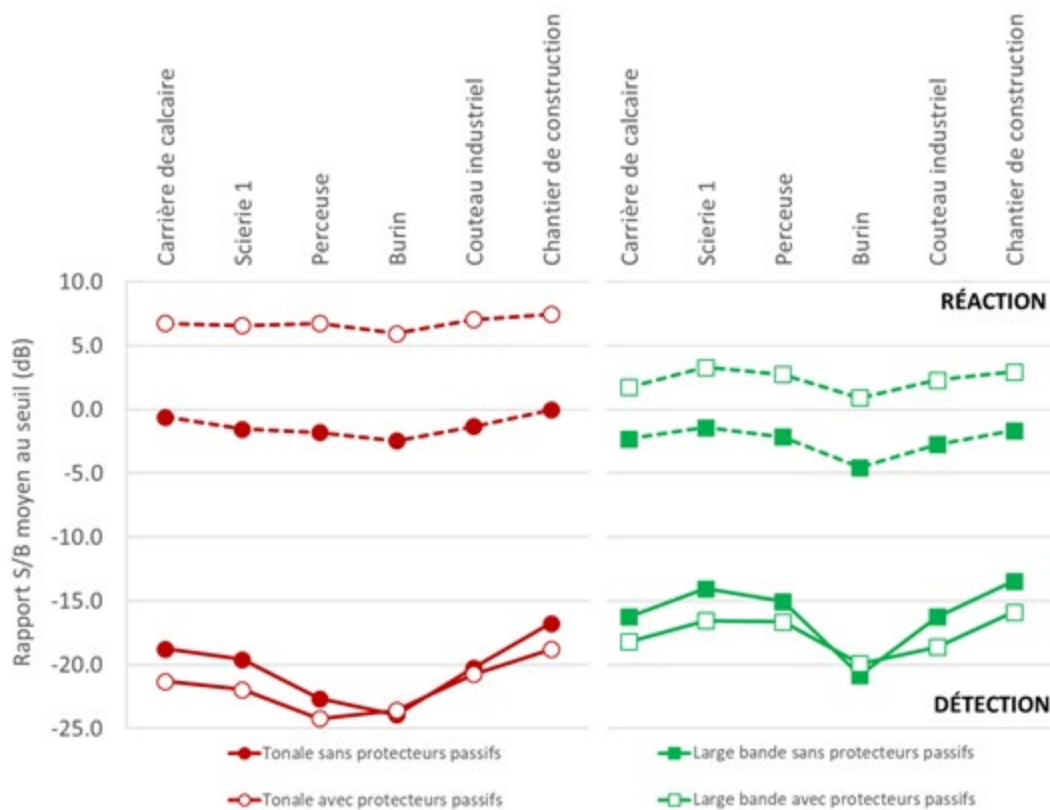


Figure 6. Seuils moyens de détection et de réaction (exprimés en dB S/B¹) lors du port ou non des coquilles 3M Peltor Optime 95 (de type passif), dans six bruits d’environnement de travail

Tableau 2. Moyennes et écarts-types pour les seuils de détection et de réaction pour l’alarme tonale (haut) et l’alarme à large bande (bas) avec/sans les coquilles passives

Alarme tonale – Coquilles passives

Bruit	Seuils de détection		Seuils de réaction	
	Sans protecteurs	Avec protecteurs	Sans protecteurs	Avec protecteurs
Carrière de calcaire	-18,8 (2,5)	-21,3 (4,1)	-0,6 (5,4)	6,8 (5,0)
Scierie 1	-19,6 (2,3)	-22,0 (3,8)	-1,5 (5,0)	6,6 (5,0)
Perceuse	-22,7 (2,6)	-24,2 (4,2)	-1,8 (6,0)	6,8 (5,6)
Burin	-23,9 (2,5)	-23,6 (5,4)	-2,5 (5,6)	6,0 (5,4)
Couteau industriel	-20,3 (3,0)	-20,8 (3,7)	-1,3 (5,5)	7,0 (5,1)
Chantier de construction	-16,8 (2,4)	-18,8 (4,5)	0,0 (4,9)	7,5 (4,9)

Alarme à large bande – Coquilles passives

Bruit	Seuils de détection		Seuils de réaction	
	Sans protecteurs	Avec protecteurs	Sans protecteurs	Avec protecteurs
Carrière de calcaire	-16,3 (1,6)	-18,2 (3,5)	-2,3 (4,8)	1,8 (4,2)
Scierie 1	-14,0 (1,5)	-16,5 (3,3)	-1,4 (4,6)	3,3 (4,2)
Perceuse	-15,0 (2,1)	-16,6 (2,9)	-2,2 (4,6)	2,8 (4,6)
Burin	-20,8 (1,6)	-19,9 (3,4)	-4,5 (4,9)	0,9 (4,9)
Couteau industriel	-16,3 (2,6)	-18,6 (3,6)	-2,8 (4,8)	2,3 (4,0)
Chantier de construction	-13,5 (2,2)	-15,9 (3,1)	-1,7 (4,3)	3,0 (3,9)

4.2.1.2 Analyses statistiques – seuils de détection

Pour les seuils de détection, une ANOVA à mesures répétées sur trois facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 92,77$, $p < 0,001$], le type de bruit [$F(5,115) = 138,03$, $p < 0,001$] et la condition de protection [$F(1,23) = 6,57$, $p = 0,017$], ainsi que des interactions significatives entre les facteurs alarme x bruit [$F(5,115) = 51,41$, $p < 0,001$], bruit x condition de protection [$F(5,115) = 16,06$, $p < 0,001$] et alarme x bruit x condition de protection [$F(5,115) = 3,51$, $p = 0,005$], mais pas alarme x condition de protection [$F(1,23) = 0,13$, $p = 0,726$]. Les seuils de détection étaient plus faibles (meilleurs) avec les coquilles que sans protection, la différence moyenne sur l'ensemble des bruits étant de 1,4 dB pour l'alarme tonale et de 1,7 dB pour l'alarme à large bande.

- Effet du protecteur auditif

Pour examiner davantage l'effet des protecteurs auditifs dans chacun des six bruits et pour chacune des alarmes, des comparaisons multiples de type test t (avec alpha de 0,05) ont été effectuées. Il en résulte que les protecteurs ont légèrement amélioré les seuils de détection dans trois des six bruits pour l'alarme tonale (jusqu'à 2,5 dB d'amélioration dans le bruit d'une carrière de calcaire) et dans cinq des six bruits pour l'alarme à large bande (amélioration maximale de 2,5 dB dans le bruit d'une scierie), les autres comparaisons n'étant pas significatives.

- Effet du type d'alarme

En ce qui concerne l'effet du type d'alarme, les comparaisons multiples effectuées sans et avec protecteurs auditifs dans chacun des six bruits se toutes avérées significatives; les seuils de détection étant plus faibles de 2,1 à 7,6 dB (moyenne = 4,2) pour l'alarme tonale que pour l'alarme à large bande.

- Effet du type de bruit

Finalement, en ce qui a trait à l'effet du type de bruit et de ses interactions avec les autres facteurs, l'étendue des seuils de détection sur l'ensemble des bruits s'élève à 7 dB sans protecteurs auditifs et à 4-5 dB avec les coquilles passives pour les deux alarmes.

4.2.1.3 Analyses statistiques – seuils de réaction

Pour les seuils de réaction, une ANOVA à mesures répétées sur trois facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 46,33$, $p < 0,001$], le type de bruit [$F(5,115) = 18,74$, $p < 0,001$] et la condition de protection [$F(1,23) = 58,35$, $p < 0,001$], ainsi que des interactions significatives entre les facteurs alarme x bruit [$F(5,115) = 9,23$, $p < 0,001$], alarme x condition de protection [$F(1,23) = 57,01$, $p < 0,001$] et bruit x condition de protection [$F(5,115) = 2,46$, $p = 0,037$], mais pas alarme x bruit x condition de protection [$F(5,115) = 0,366$, $p = 0,871$]. Les seuils de réaction étaient plus faibles (meilleurs) sans protection auditive qu'avec les coquilles passives, la différence moyenne sur l'ensemble des bruits étant de 8,0 dB pour l'alarme tonale et de 4,8 dB pour l'alarme à large bande.

- Effet du protecteur auditif

Pour examiner davantage l'effet des protecteurs auditifs dans chacun des six bruits et pour chacune des alarmes, des comparaisons multiples de type test t (avec alpha de 0,05) ont été effectuées. Il en résulte que les protecteurs auditifs ont fait augmenter significativement les seuils de réaction dans tous les bruits pour l'alarme tonale (d'une valeur atteignant 8,5 dB dans le bruit d'une perceuse) et pour l'alarme à large bande (élévation maximale de 5,5 dB dans le bruit d'un burin).

- Effet du type d'alarme

En ce qui concerne l'effet du type d'alarme, les comparaisons multiples effectuées sans et avec protecteurs auditifs dans chacun des six bruits ont révélé des seuils de réaction significativement plus faibles pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale dans quatre des six bruits sans protecteurs auditifs (différence maximale de 2,1 dB dans le bruit d'un burin) et dans les six bruits avec les coquilles passives (différence maximale de 5,0 dB dans les bruits d'une carrière de calcaire et celui d'un burin).

- Effet du type de bruit

Finalement, en ce qui a trait à l'effet du type de bruit et de ses interactions avec les autres facteurs, l'étendue des seuils de réaction sur l'ensemble des bruits s'élève à 2-3 dB sans protection auditive et à 2 dB avec les coquilles passives pour les deux alarmes.

4.2.1.4 Sommaire – protecteurs auditifs passifs

Les deux types d'alarmes de recul demeurent audibles à des niveaux sonores largement inférieurs au bruit, avec et sans protecteurs auditifs, de l'ordre de -13 dB à -24 dB. Les seuils de réaction sont quant à eux de l'ordre de -5 dB à 0 dB sans protecteurs auditifs, et de 1 dB à 8 dB avec les protecteurs.

- Effet du type d'alarme

Dans l'ensemble (Figure 6), l'alarme tonale s'est avérée plus facile à détecter que l'alarme à large bande (seuils plus faibles d'environ 4,2 dB en moyenne sur l'ensemble des conditions de protection), mais a provoqué une réaction à des niveaux sonores plus élevés que l'alarme à large bande, particulièrement quand les coquilles passives étaient utilisées. En effet, les seuils de réaction pour l'alarme tonale étaient en moyenne 1,2 et 4,4 dB plus élevés sans et avec protecteurs auditifs, respectivement, que ceux obtenus avec l'alarme à large bande.

- Effet du protecteur auditif

L'utilisation des coquilles passives a légèrement amélioré les seuils de détection (d'environ 1-2 dB pour les deux types d'alarmes) comparativement à la condition sans protecteurs auditifs, mais a fait significativement augmenter les seuils de réaction (d'environ 8 dB pour l'alarme tonale et 5 dB pour l'alarme à large bande).

- Effet du type de bruit

Finalement, l'effet du type de bruit était nettement plus important sur les seuils de détection (environ 7 dB sans protecteurs auditifs et 4-5 dB avec les coquilles) que sur les seuils de réaction (environ 2-3 dB sans et avec les coquilles) pour les deux types d'alarmes.

4.2.2 Protecteurs auditifs à rétablissement de son

4.2.2.1 Résultats moyens

Les seuils de détection et de réaction moyennés sur l'ensemble des participants, pour un sous-ensemble de trois bruits, sont illustrés pour l'alarme tonale (panneau de gauche) et l'alarme à large bande (panneau de droite) à la Figure 7 pour les bouchons 3M PELTOR Tactical et à la Figure 8 pour les coquilles 3M PELTOR Protac III. Les seuils sont exprimés en rapport S/B. Les moyennes et les écarts-types pour les deux types d'alarme sont présentés au Tableau 3, afin d'apprécier l'étendue des résultats ainsi que la variabilité intersujets.

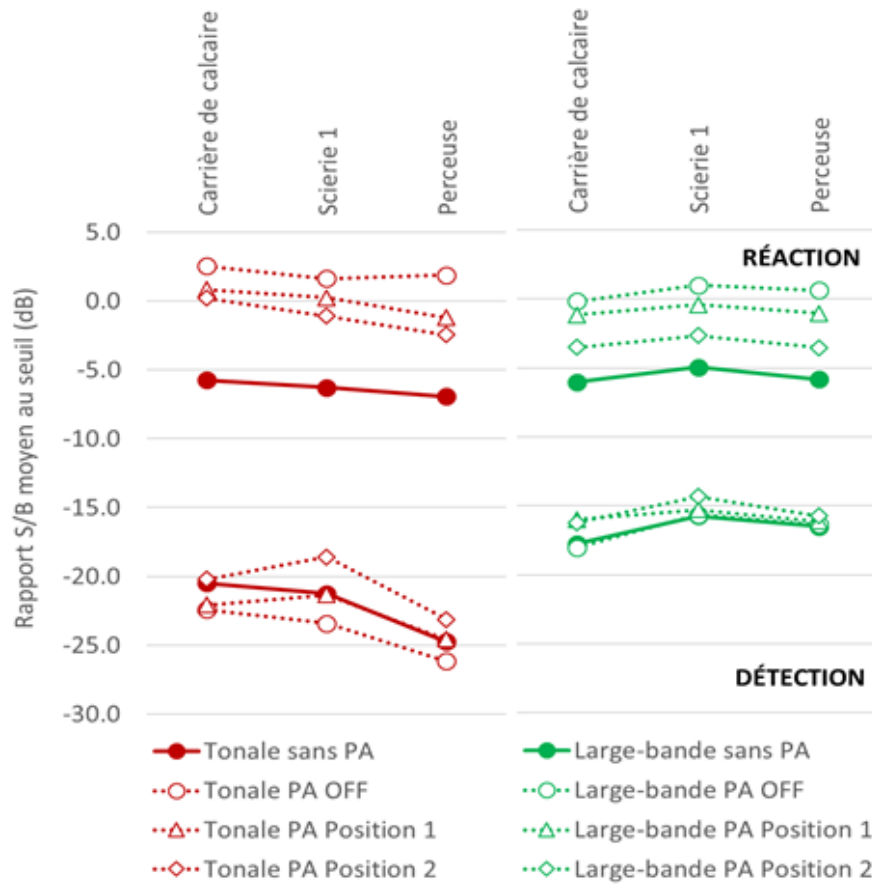


Figure 7. Seuils moyens de détection et de réaction (exprimés en dB S/B¹) lors du port ou non des bouchons à rétablissement sonore 3M PELTOR Tactical, dans trois bruits d'environnement de travail.

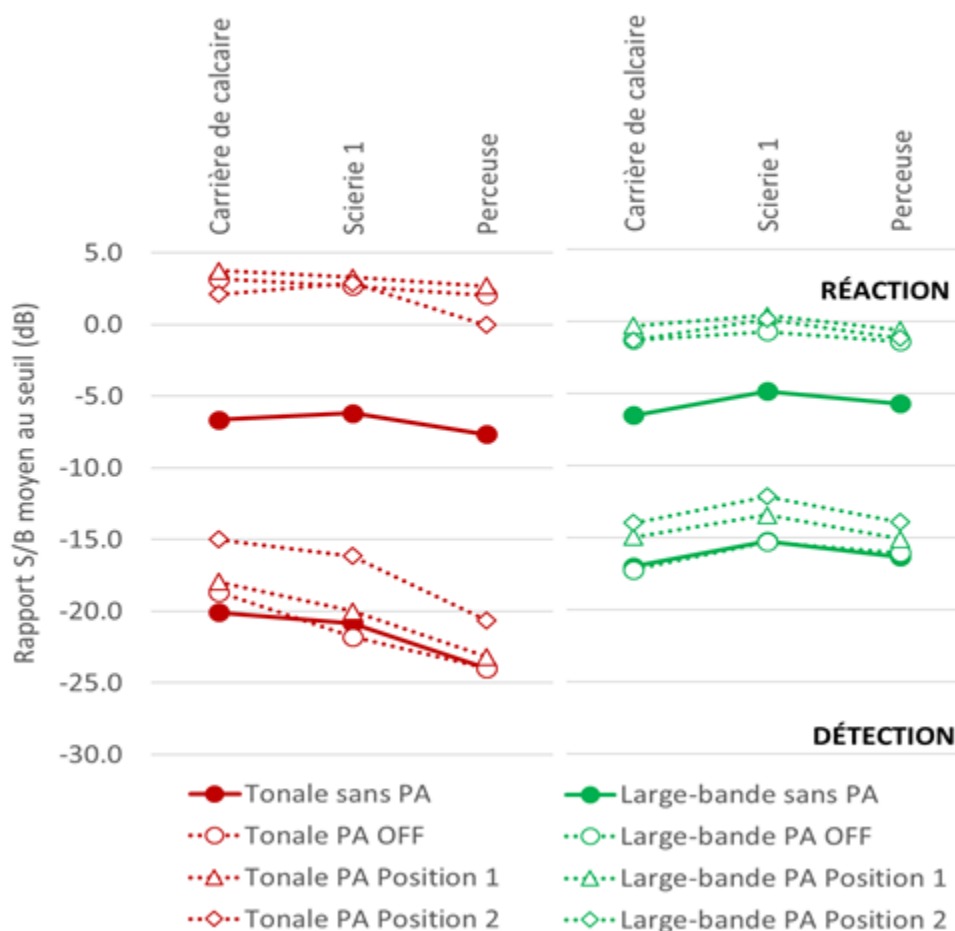


Figure 8. Seuils moyens de détection et de réaction (exprimés en dB S/B¹) lors du port ou non des coquilles à rétablissement sonore 3M PELTOR Protac III, dans trois bruits d’environnement de travail.

Des analyses statistiques ont été effectuées séparément pour les seuils moyens de détection et de réaction, pour chacun des protecteurs auditifs à rétablissement de son, à l’aide d’une ANOVA à mesures répétées avec trois facteurs intrasujets : 1) type d’alarme (2 niveaux : tonale et à large bande), 2) type de bruit (3 niveaux : carrière de calcaire, scierie et perceuse), 3) condition de protection [4 niveaux : oreilles non couvertes (sans protecteurs auditifs), protecteur auditif en mode passif (« OFF »), protecteur auditif en position 1 et protecteur auditif en position 2]. Les résultats sont résumés dans les paragraphes qui suivent. Dans les situations où un effet significatif a été obtenu, des comparaisons multiples de type test t (avec un alpha de 0,05) ont permis de déterminer plus précisément les différences entre les niveaux des facteurs.

Tableau 3. Moyennes et écarts-types pour les seuils de détection et de réaction pour l'alarme tonale (haut) et l'alarme à large bande (bas) avec/sans les protecteurs à rétablissement de son**Alarme tonale - Bouchons à rétablissement de son**

Bruit	Seuils de détection				Seuils de réaction			
	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2
Carrière de calcaire	-20,5 (2,0)	-22,4 (3,4)	-22,1 (3,4)	-20,2 (2,6)	-5,8 (4,9)	2,5 (7,6)	0,8 (7,5)	0,2 (7,0)
Scierie 1	-21,3 (2,2)	-23,4 (3,1)	-21,3 (3,2)	-18,6 (2,6)	-6,3 (4,9)	1,6 (8,1)	0,3 (7,8)	-1,1 (6,9)
Perceuse	-24,8 (2,4)	-26,2 (3,7)	-24,6 (3,2)	-23,1 (2,7)	-6,9 (5,2)	1,9 (8,6)	-1,2 (8,9)	-2,5 (7,6)

Alarme à large bande - Bouchons à rétablissement de son

Bruit	Seuils de détection				Seuils de réaction			
	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2
Carrière de calcaire	-17,8 (3,2)	-18,0 (2,2)	-16,0 (2,1)	-16,2 (3,2)	-6,0 (3,5)	-0,2 (6,2)	-1,2 (6,5)	-3,5 (5,0)
Scierie 1	-15,8 (2,0)	-15,7 (1,8)	-15,3 (2,9)	-14,3 (3,0)	-5,0 (3,2)	1,0 (5,8)	-0,4 (6,3)	-2,7 (5,2)
Perceuse	-16,5 (2,6)	-16,4 (1,8)	-16,1 (3,0)	-15,8 (3,6)	-5,8 (3,4)	0,6 (6,1)	-1,1 (6,5)	-3,5 (5,1)

(Suite tableau 3)

Alarme tonale - Coquilles à rétablissement de son

Bruit	Seuils de détection				Seuils de réaction			
	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2
Carrière de calcaire	-20,1 (2,1)	-18,7 (4,2)	-18,0 (3,8)	-15,0 (4,1)	-6,7 (3,7)	3,2 (6,0)	3,8 (6,6)	2,1 (6,0)
Scierie 1	-20,8 (2,1)	-21,8 (3,4)	-20,0 (3,5)	-16,2 (3,5)	-6,2 (4,0)	2,7 (6,9)	3,3 (7,3)	2,9 (6,0)
Perceuse	-24,0 (2,1)	-24,0 (3,8)	-23,2 (3,7)	-20,6 (3,7)	-7,7 (4,0)	2,0 (7,1)	2,7 (7,4)	0,0 (6,4)

Alarme à large bande - Coquilles à rétablissement de son

Bruit	Seuils de détection				Seuils de réaction			
	Sans protecteurs	Sans PA	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2	PA OFF	PA Position 1	PA Position 2
Carrière de calcaire	-17,0 (3,0)	-17,2 (2,7)	-15,0 (2,3)	-14,0 (2,3)	-6,5 (2,8)	-1,3 (5,4)	-0,3 (5,3)	-1,3 (4,5)
Scierie 1	-15,3 (2,4)	-15,3 (2,0)	-13,4 (1,9)	-12,1 (2,2)	-4,8 (2,9)	-0,7 (5,3)	0,4 (5,0)	0,2 (4,4)
Perceuse	-16,3 (2,3)	-16,0 (1,7)	-15,1 (1,9)	-14,0 (2,0)	-5,7 (3,2)	-1,4 (5,0)	-0,6 (5,5)	-1,2 (4,8)

4.2.2.2 Analyses statistiques - seuils de détection

4.2.2.2.1 Bouchons 3M PELTOR Tactical

Une ANOVA à mesures répétées sur trois facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 221,19$, $p < 0,001$], le type de bruit [$F(2,46) = 103,36$, $p < 0,001$] et la condition de protection auditive [$F(1,94,44.71) = 12,24$, $p < 0,001$], ainsi que des interactions significatives entre les facteurs alarme x bruit [$F(2,46) = 68,78$, $p < 0,001$], alarme x condition de protection [$F(3,69) = 8,06$, $p < 0,001$], bruit x condition de protection [$F(4,11, 94.42) = 3,58$, $p = 0.009$] et alarme x bruit x condition de protection [$F(6,138) = 6,02$, $p < 0,001$].

- Effet du type d'alarme

Les seuils de détection étaient statistiquement plus faibles (meilleurs) pour l'alarme tonale que pour l'alarme à large bande dans les 12 comparaisons possibles selon le type de bruit et la condition de protection, de 2,8 dB (sans protection dans le bruit d'une carrière) à 9,8 dB (protecteur en mode OFF dans le bruit d'une perceuse).

- Effet du type de bruit

Pour l'alarme tonale, la différence entre les seuils de détection mesurés dans les divers bruits était statistiquement significative dans 11 des 12 comparaisons possibles, variant de 0,8 dB (scierie meilleure (>)² que carrière sans protecteurs auditifs) à 4,5 dB (perceuse > carrière) pour le protecteur en position 2). La seule différence n'ayant pas atteint le degré de signification est celle entre les bruits d'une carrière et ceux d'une scierie pour le protecteur en position 1.

Pour l'alarme à large bande, une différence statistiquement significative entre les bruits s'est avérée moins fréquente (seulement 4 des 12 comparaisons possibles) et généralement plus faible, atteignant un maximum d'au plus 2,4 dB (carrière > scierie pour le protecteur en mode OFF).

- Effet du protecteur auditif

Pour l'alarme tonale, des différences statistiquement significatives entre les seuils de détection mesurés dans les diverses conditions de protection auditive ont été notées dans 11 des 18 comparaisons possibles, variant de 1,5 dB (protecteur en position 1 > position 2 dans le bruit d'une perceuse) à 4,8 dB (protecteur en mode OFF > position 2 dans le bruit d'une scierie). À noter, les seuils de détection mesurés avec les bouchons en position 2 étaient significativement plus élevés (pires) que ceux mesurés dans les trois autres conditions de protection, dans tous les bruits, sauf si on compare le protecteur en position 2 à la condition sans protecteurs auditifs dans le bruit d'une carrière (Figure 7). Mis à part ce bruit, les seuils obtenus avec le protecteur en position 1 étaient également plus élevés que ceux mesurés avec le protecteur en mode OFF.

² Le signe > est utilisé pour indiquer « meilleur que ».

Pour l'alarme à large bande, une différence entre les conditions de protection s'est avérée statistiquement significative seulement dans le bruit d'une carrière, avec un seuil de détection moyen d'environ 2 dB plus élevé pour le protecteur dans les positions 1 et 2 comparativement au protecteur en mode OFF, et pour le protecteur en position 1 comparativement à la condition sans protecteurs auditifs. Ainsi, seulement 3 des 18 comparaisons possibles ont atteint un degré de signification statistique.

Pour les deux alarmes, les seuils de détection mesurés sans protecteurs auditifs étaient similaires à ceux obtenus avec le protecteur en mode OFF, sauf dans le cas de l'alarme tonale dans le bruit d'une scierie (différence de 2,2 dB).

4.2.2.2 Coquilles 3M PELTOR Protac III

Une ANOVA à mesures répétées sur trois facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 182,29$, $p < 0,001$], le type de bruit [$F(2,46) = 74,99$, $p < 0,001$] et la condition de protection [$F(3,69) = 41,76$, $p < 0,001$], ainsi que des interactions significatives entre les facteurs alarme x bruit [$F(1.43,32.92) = 164,92$, $p < 0,001$], alarme x condition de protection [$F(3,69) = 3,02$, $p = 0,035$], bruit x condition de protection [$F(4,40, 101,24) = 4,37$, $p = 0,002$] et alarme x bruit x condition de protection [$F(6,138) = 3,17$, $p = 0,006$].

- Effet du type d'alarme

Les seuils de détection étaient statistiquement plus faibles (meilleurs) pour l'alarme tonale que pour l'alarme à large bande dans 10 des 12 comparaisons possibles selon le type bruit et la condition de protection, de 3,0 dB (protecteur en position 1 dans le bruit d'une carrière) à 8,1 dB (protecteur en position 1 dans le bruit d'une perceuse).

- Effet du type de bruit

Pour l'alarme tonale, la différence entre les seuils de détection mesurés dans les divers bruits était statistiquement significative dans 11 des 12 comparaisons possibles, variant de 1,2 dB (scierie > carrière avec protecteur en position 2) à 5,6 dB (perceuse > scierie pour le protecteur en position 2). La seule différence n'ayant pas atteint le degré de signification est celle entre les bruits d'une carrière et ceux d'une scierie sans protecteurs auditifs.

Pour l'alarme à large bande, une différence statistiquement significative entre les bruits s'est avérée moins fréquente (7 des 12 comparaisons possibles), mais la taille d'effet n'excédait pas 2 dB. Les seuils de détection obtenus dans le bruit d'une scierie étaient systématiquement plus élevés que ceux mesurés dans les bruits d'une carrière et d'une perceuse, alors qu'aucune différence n'a été notée entre ces deux derniers bruits.

- Effet du protecteur auditif

Pour l'alarme tonale, des différences statistiquement significatives entre les seuils de détection mesurés dans les diverses conditions de protection ont été notées dans 10 des 18 comparaisons possibles, variant de 2,1 dB (sans protection > position 1 dans le bruit d'une carrière) à 5,6 dB (protecteurs auditifs en mode OFF > position 2 dans le bruit d'une scierie). Les seuils de détection mesurés avec les coquilles en position 2 étaient significativement plus

élevés (pires) que ceux mesurés dans les trois autres conditions de protection, dans tous les bruits. La seule autre différence significative n'impliquant pas le protecteur en position 2 a été notée entre la condition sans protecteurs auditifs et celle avec le protecteur en position 1 dans le bruit d'une carrière.

Pour l'alarme à large bande, une différence entre les conditions de protection s'est avérée statistiquement significative dans 13 des 18 comparaisons possibles, variant de 1,2 dB (position 1 > position 2 dans le bruit d'une perceuse) à 3,3 dB (protecteur en mode OFF > position 2 dans le bruit d'une carrière). À noter, les seuils de détection de l'alarme à large bande étaient toujours significativement plus élevés (de 1,3 à 3,1 dB) lorsque le protecteur était en mode opérationnel (protecteur dans les positions 1 ou 2) comparativement à la condition sans protecteurs auditifs, et toujours plus élevés avec le protecteur en position 2 comparativement au mode OFF. L'utilisation du protecteur avec volume réglé en position 1 s'est également traduite en des seuils de détection significativement plus élevés comparativement au mode OFF, sauf dans le bruit d'une perceuse. Finalement, les seuils étaient significativement plus élevés avec le volume 2 qu'avec le volume 1, sauf dans le bruit de la carrière, mais la différence était limitée à environ 1 dB.

Pour les deux alarmes, les seuils de détection mesurés sans protecteurs auditifs n'étaient pas significativement différents de ceux obtenus avec le protecteur en mode OFF, dans tous les bruits.

4.2.2.3 Analyses statistiques - seuils de réaction

4.2.2.3.1 Bouchons 3M PELTOR Tactical

Une ANOVA à mesures répétées sur trois facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type de bruit [$F(2,46) = 10,67, p < 0,001$] et la condition de protection [$F(2,1,47.2) = 54,34, p < 0,001$], ainsi que des interactions significatives entre les facteurs alarme x bruit [$F(2,46) = 46,91, p < 0,001$], alarme x condition de protection [$F(3,69) = 17,35, p < 0,001$] et bruit x condition de protection [$F(6,138) = 3,80, p = 0,002$], mais pas d'effet principal pour le type d'alarme [$F(1,23) = 2,26, p = 0,138$] ni d'interaction entre les trois facteurs (alarme x bruit x condition de protection [$F(6,138) = 1,77, p = 0,110$]).

- Effet du type d'alarme

Les seuils de réaction étaient statistiquement plus faibles (meilleurs) pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale dans seulement 2 des 12 comparaisons possibles selon le type de bruit et la condition de protection, de 2,7 dB avec les bouchons en mode OFF dans le bruit d'une carrière et de 3,7 dB avec les bouchons en position 2 dans le même bruit.

- Effet du type de bruit

Pour l'alarme tonale, la différence entre les seuils de réaction mesurés dans les divers bruits était statistiquement significative dans 6 des 12 comparaisons possibles, variant de 1,2 dB (perceuse > carrière sans protecteurs auditifs) à 2,7 dB (perceuse > carrière pour le protecteur en position 2).

Pour l'alarme à large bande, une différence statistiquement significative entre les bruits sur l'ensemble des conditions de protection s'est avérée moins fréquente (seulement dans 4 des 12 comparaisons possibles) et était limitée à environ 1 dB.

- Effet du protecteur auditif

Pour l'alarme tonale, des différences statistiquement significatives entre les seuils de réaction mesurés dans les diverses conditions de protection ont été notées dans 13 des 18 comparaisons possibles, variant de 2,7 dB (position 2 > mode OFF dans le bruit d'une scierie) à 8,8 dB (sans protecteurs auditifs > mode OFF dans le bruit d'une perceuse). Les seuils de réaction mesurés avec les bouchons étaient statistiquement plus élevés (pires) que ceux sans protecteurs auditifs (de 7,9 à 8,8 dB en mode OFF, 5,7 à 6,6 dB en position 1 et 4,5 à 6,0 dB en position 2 sur l'ensemble des bruits) (Figure 7). L'utilisation du protecteur en mode OFF semble davantage nuire à la réaction sonore, se traduisant par des seuils de réaction les plus élevés, alors que l'utilisation des bouchons en mode de rétablissement sonore rapproche les seuils de réaction des valeurs obtenues sans protecteurs auditifs. En effet, comparativement au mode OFF, le protecteur en position 2 a amélioré les seuils de réaction de 2,3 à 4,3 dB sur l'ensemble des bruits, alors que le protecteur en position 1 a amélioré le seuil (de 3,1 dB) seulement dans le bruit d'une perceuse. Une différence statistiquement significative n'a été notée entre le protecteur dans les positions 1 et 2 dans aucun des bruits.

Pour l'alarme à large bande, une différence entre les conditions de protection s'est avérée statistiquement significative dans presque toutes (16 sur 18) les comparaisons possibles, sauf lorsque le mode OFF est comparé au protecteur en position 1 dans les bruits d'une carrière et d'une scierie. Les seuils de réaction étaient significativement plus élevés (pires) avec les bouchons que sans protecteurs auditifs (de 5,9 à 6, dB en mode OFF, de 4,5 à 4,9 dB au protecteur en position 1, et de 2,3 à 2,5 dB au protecteur en position 2 sur l'ensemble des bruits) (Figure 7). Encore une fois, l'utilisation du protecteur en mode OFF a nuï davantage à la réaction sonore, se traduisant par des seuils de réaction les plus élevés, alors que l'utilisation des bouchons en mode de rétablissement sonore rapproche les seuils de réaction des valeurs obtenues sans protecteurs auditifs. En effet, comparativement au mode OFF, le protecteur en position 2 a amélioré les seuils de réaction de 3,3 à 4,2 dB, alors que le protecteur en position 1 a amélioré le seuil (de 1,7 dB) seulement dans le bruit d'une perceuse. Finalement, comparativement au protecteur en position 1, la position 2 a amélioré le seuil de réaction de 2,3 à 2,5 dB sur l'ensemble des bruits.

4.2.2.3.2 Coquilles 3M PELTOR Protac III

Une ANOVA à mesures répétées sur trois facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 10,995$, $p = 0,003$], le type de bruit [$F(2,46) = 19,61$, $p < 0,001$] et la condition de protection [$F(2,3,52.7) = 72,38$, $p < 0,001$], ainsi que des interactions significatives entre les facteurs alarme x bruit [$F(2,46) = 14,29$, $p < 0,001$], alarme x condition de protection [$F(3,69) = 21,60$, $p < 0,001$], bruit x condition de protection [$F(6,138) = 3,97$, $p = 0,001$] et alarme x bruit x condition de protection [$F(6,138) = 2,42$, $p = 0,03$].

- Effet du type d'alarme

Les seuils de réaction étaient statistiquement plus faibles (meilleurs) pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale dans 7 des 12 comparaisons possibles selon le type de bruit et la condition de protection, de 2,9 dB (protecteur en position 1 dans le bruit d'une scierie) à 4,4 dB (mode OFF dans le bruit d'une carrière).

- Effet du type de bruit

Pour l'alarme tonale, la différence entre les seuils de réaction mesurés dans les divers bruits était statistiquement significative dans 4 des 12 comparaisons possibles, variant de 1 dB (perceuse > carrière sans protecteurs auditifs) à 2,9 dB (perceuse > scierie pour le protecteur en position 2).

Pour l'alarme à large bande, une différence statistiquement significative entre les bruits a été notée dans 5 des 12 comparaisons possibles et était d'une valeur de moins de 2 dB (différence maximale de 1,7 dB entre les bruits d'une carrière et ceux d'une scierie dans la condition sans protecteurs auditifs).

Pour les deux alarmes, les seuils de réaction étaient similaires pour le mode OFF et le protecteur en position 1.

- Effet du protecteur auditif

Pour l'alarme tonale, des différences statistiquement significatives entre les seuils de réaction mesurés dans les diverses conditions de protection ont été notées dans 11 des 18 comparaisons possibles, variant de 1,7 dB (position 2 > position 1 dans le bruit d'une carrière) à 10,4 dB (sans protecteurs auditifs > position 1 dans le bruit d'une carrière). Les seuils de réaction mesurés avec les coquilles étaient statistiquement plus élevés (pires) que ceux sans protecteurs auditifs (de 8,9 à 9,8 dB en mode OFF, 9,5 à 10,4 dB au protecteur en position 1 et 7,6 à 9,1 dB au protecteur en position 2 sur l'ensemble des bruits) (Figure 8). Par contre, les seuils de réaction n'étaient pas significativement différents entre les différents modes d'opération des coquilles. En effet, des différences significatives ont seulement été notées entre les positions 1 et 2 dans les bruits d'une carrière (1,7 dB) et ceux d'une perceuse (2,7 dB).

Pour l'alarme à large bande, une différence entre les conditions de protection s'est avérée statistiquement significative dans 10 des 18 comparaisons possibles, incluant les 9 comparaisons entre la condition sans protecteurs auditifs et les conditions d'utilisation des coquilles en mode OFF ou en mode de rétablissement de son. En effet, les seuils de réaction étaient significativement plus élevés (pires) avec les bouchons que sans protecteurs auditifs (avec une élévation du seuil de 4,1 à 5,3 dB en mode OFF, de 5,1 à 6,2 dB avec le protecteur en position 1, et de 4,5 à 5,2 dB avec le protecteur en position 2)(Figure 8). La comparaison entre les coquilles utilisées en mode passif et en mode de rétablissement sonore (positions 1 et 2) n'a pas révélé de différence statistiquement significative, à l'exception d'une différence de 1 dB entre le mode OFF et la position 1 dans le bruit d'une scierie.

4.2.2.4 Sommaire – protecteurs auditifs à rétablissement de son

Les deux types d'alarmes de recul demeurent audibles à des niveaux sonores largement inférieurs au bruit, avec et sans protecteurs auditifs à rétablissement de son, de l'ordre de -12 dB à -25 dB. Les seuils de réaction sont quant à eux de l'ordre de -5 dB à -8 dB sans protecteurs auditifs, et de -4 dB à 4 dB avec protecteurs auditifs pour l'ensemble des conditions de protection.

- Effet de l'alarme

Les résultats obtenus avec les protecteurs à rétablissement de son ont démontré que l'alarme tonale est plus facile à détecter que celle à large bande (seuils plus faibles d'environ 6,2 dB en moyenne pour les bouchons à rétablissement de son et de 5,1 dB en moyenne pour les coquilles à rétablissement de son), mais provoque une réaction à des niveaux sonores 3-4 dB plus élevés que l'alarme à large bande, particulièrement quand les coquilles sont utilisées.

- Effet du type de bruit

Pour les deux types de protecteurs auditifs à rétablissement de son, l'effet du type de bruit était également plus important sur les seuils de détection (avec des différences entre les bruits pouvant atteindre 5-6 dB pour l'alarme tonale et 2 dB pour l'alarme à large bande sur l'ensemble des conditions de protection) que sur les seuils de réaction (différences entre les bruits jusqu'à 3 dB pour l'alarme tonale et de moins de 2 dB pour l'alarme à large bande sur l'ensemble des conditions de protection).

- Effet du protecteur auditif

L'effet du protecteur auditif semble dépendre du type de protecteurs à rétablissement de son.

Pour les bouchons à rétablissement de son, les seuils de détection variaient très peu entre les conditions de protection pour l'alarme à large bande, alors que des différences jusqu'à 5 dB ont été obtenues pour l'alarme tonale, avec une tendance d'élévation du seuil de détection en passant progressivement du mode OFF à la position 1 et à la position 2. Par contre, pour les deux alarmes, les seuils de détection sans protecteurs auditifs étaient similaires à ceux du mode OFF. En ce qui concerne les seuils de réaction, la différence entre les conditions de protection a atteint un maximum de 9 dB pour l'alarme tonale et de 7 dB pour l'alarme à large bande, les seuils de réaction étant les plus élevés dans le mode OFF pour progressivement se rapprocher des valeurs sans protecteurs auditifs avec une augmentation du volume.

Pour les coquilles à rétablissement de son, un comportement différent a été noté. Les seuils de détection ont varié davantage entre les différentes conditions de protection, particulièrement pour l'alarme à large bande, avec des seuils plus élevés avec le protecteur en position 2 (jusqu'à 3,3 dB) comparativement à la condition sans protecteurs auditifs, et pour le protecteur dans les positions 1 et 2 comparativement au mode OFF. Pour l'alarme tonale, le protecteur en position 2 s'est traduit en des seuils de détection plus élevés (jusqu'à 5,6 dB) que dans les autres conditions de protection, ces dernières donnant des seuils relativement similaires. Pour les deux alarmes, les seuils de détection sans protecteurs auditifs étaient similaires à ceux obtenus en mode OFF. En ce qui concerne les seuils de réaction, la différence entre les

conditions de protection a atteint un maximum de 10 dB pour l'alarme tonale et de 6 dB pour l'alarme à large bande, et les seuils étaient similaires pour les différents modes d'opération des coquilles (OFF, position 1 et position 2) mais supérieurs à ceux obtenus sans protecteurs auditifs.

4.3 Discussion Volet 1 – Effet des protecteurs auditifs sur les seuils de détection et de réaction

Sans protecteurs auditifs, les alarmes de recul étaient audibles à des niveaux nettement inférieurs à celui du bruit. Les seuils de détection étaient sensibles au type d'alarme ainsi qu'aux caractéristiques temporelles et spectrales des bruits. Les seuils de réaction quant à eux, s'approchaient du niveau de bruit et étaient beaucoup moins sensibles aux effets du type d'alarme et du type de bruit.

4.3.1 Pistes d'explication des résultats obtenus

Malgré que les deux séries d'essais du volet 1 aient été réalisées par deux expérimentateurs différents, les seuils de détection sans protecteurs auditifs sont pratiquement identiques d'une série à l'autre, avec des différences inférieures à 2 dB. Par contre, les seuils de réaction sans protecteurs auditifs étaient plus faibles (meilleurs) dans le groupe d'utilisateurs des protecteurs à rétablissement de son comparativement aux données obtenues dans les mêmes bruits auprès du groupe d'utilisateur des protecteurs passifs. Notons également que dans les deux séries d'essais, le seuil de retrait était plus variable d'un participant à l'autre que le seuil de détection. Ainsi, il semble que le critère de décision pour le seuil de réaction soit plus sensible aux différences d'interprétation interindividuelles que le seuil de détection. Le biais de l'expérimentateur dans la formulation des instructions aux participants pourrait aussi avoir contribué aux différences entre les deux séries d'essais.

Sur l'ensemble des conditions de protection, l'alarme à large bande a généralement donné lieu à des seuils de détection plus élevés (pires), mais des seuils de réaction plus faibles (meilleurs), que l'alarme tonale. De tels résultats sont compatibles avec les données de (Vaillancourt *et al.*, 2013). Cela peut être expliqué par un plus grand effet masquant pour la détection sonore et une croissance plus rapide de la sonie pour la réaction, en raison du spectre plus riche en fréquences de l'alarme à large bande. Également en conformité avec l'étude de (Vaillancourt *et al.*, 2013), les résultats ont démontré que les seuils de réaction sont moins influencés par les caractéristiques temporelles et spectrales des alarmes et des bruits que les seuils de détection, mais sont plus sensibles aux effets des protecteurs auditifs.

Les coquilles passives PELTOR Optime 95 ont engendré une légère diminution (amélioration) des seuils de détection des deux alarmes comparativement à la condition sans protection. Cet effet, aussi noté dans notre première étude [[Rapport R-763](#) (Vaillancourt *et al.*, 2012)], semble lié à l'élargissement des filtres auditifs avec le niveau sonore chez les individus avec audition normale (ANSI/ASA S3.4-2007 R2017(2017)), ce qui rend la détection de signaux dans du bruit élevé un peu plus difficile sans protection. L'effet des coquilles passives était par contre beaucoup plus prononcé en réaction, menant à une élévation importante des seuils, et ce particulièrement pour l'alarme tonale. Dans notre première étude [[Rapport R-763](#)(Vaillancourt *et al.*, 2012)], nous avons aussi noté que la protection auditive diminuait la sonie des alarmes de recul ainsi que le niveau d'urgence perçu à un rapport S/B fixe, tant pour les coquilles que les

bouchons passifs. Il semble donc que le niveau sonore absolu de l'alarme soit un facteur important à considérer pour la réaction, indépendamment du rapport S/B.

En ce qui concerne les protecteurs à rétablissement de son, particulièrement avec le protecteur en position 2, les deux types de protecteurs utilisés ont élevé le seuil de détection comparativement aux conditions sans protection et avec le protecteur en mode OFF. Cette élévation du seuil pourrait être expliquée par l'élargissement des filtres auditifs avec une augmentation du niveau de pression sonore, générant un plus grand effet masquant. Cette hypothèse pourrait vraisemblablement s'appliquer aux bouchons à rétablissement sonore 3M PELTOR Tactical qui offrent une certaine amplification comparativement à la condition sans protecteurs auditifs (Tableau 1). Cette hypothèse ne s'appliquerait toutefois pas aux coquilles 3M PELTOR Protac III étant donné qu'elles semblent seulement offrir une atténuation sonore, même au volume maximal. Une explication davantage plausible serait la distorsion du signal lorsqu'il est modifié électroniquement par les protecteurs.

Les seuils de réaction étaient relativement similaires, peu importe le mode opératoire utilisé (OFF, position 1 et position 2) pour les coquilles à rétablissement de son, avec des seuils de réaction plus élevés dans ces différents modes que sans protecteurs auditifs. Il est intéressant de constater que pour les bouchons à rétablissement de son, les seuils de réaction étaient plus élevés en mode OFF et s'approchaient graduellement des valeurs sans protecteurs auditifs avec une augmentation du volume. Cette différence de comportement entre les deux protecteurs est probablement due à la plus grande amplification sonore offerte par les bouchons 3M PELTOR Tactical que celle des coquilles 3M PELTOR Protac III. Une telle amélioration des seuils de réaction avec une augmentation du volume suggère encore une fois 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.

4.3.2 Comparaison des résultats aux normes d'ajustement des dispositifs d'alarmes de recul

Les résultats ont non seulement permis d'identifier les niveaux sonores supraliminaires qui provoquent une réaction immédiate aux alarmes de recul, mais également de comparer ces niveaux aux méthodes couramment utilisées pour ajuster les dispositifs d'alarmes dans les milieux de travail. La norme ISO 9533 stipule que les alarmes de recul doivent être ajustées de façon à assurer une différence égale ou supérieure à 0 dB entre les niveaux de pression sonore mesurés quand l'alarme est activée et que le moteur fonctionne à faible régime (neutre) et ceux mesurés lorsque le véhicule est en marche avec le moteur à haut régime et que l'alarme est éteinte. Cette exigence doit être rencontrée à 7 différents points de mesure derrière le véhicule. Selon une telle approche, les niveaux de l'alarme sont ajustés uniquement sur la base de niveaux globaux en dBA, sans tenir compte des caractéristiques spectrales et temporelles des alarmes ou des bruits, ni de l'effet du port de protecteurs auditifs. Il est également à noter que le bruit de fond, tel que défini par la norme, est limité au bruit du moteur à haut régime et n'inclut pas tous les autres bruits de l'environnement qui peuvent être entendus au point de réception.

Dans les deux séries d'essais du volet 1, décrites plus haut (sous-sections 4.2.1 et 4.2.2), les seuils de détection moyens variaient entre -12 et -25 dB S/B sur l'ensemble des conditions expérimentales (types d'alarme, types de bruit et conditions de protection). Ainsi, les alarmes de

recul devraient être clairement audibles lorsqu'ajustées selon les recommandations de la norme ISO 9533 (rapport S/B ≥ 0 dB), mais en prenant en considération toutes les sources de bruits présentes dans l'environnement pour caractériser le bruit total derrière le véhicule. En effet, de tels ajustements généreraient des niveaux 12 à 25 dB au-dessus du seuil masqué. Ceci serait conforme à la recommandation de certains auteurs d'ajuster le niveau d'un signal avertisseur sonore 12 à 25 dB au-dessus du seuil masqué afin d'assurer une performance optimale (Giguère *et al.*, 2008; Tran Quoc et Héту, 1996).

Un projet pilote mené par Laroche *et al.* (2015) a démontré qu'un ajustement conforme à la méthode globale avec pondération A de la norme ISO 7731 (méthode A) peut mener à des niveaux d'alarme excessivement élevés. Ces auteurs recommandaient que, malgré leur complexité, les méthodes d'ajustement basées sur des analyses en octave ou tiers d'octave soient plus appropriées pour maintenir une bonne audibilité sans générer des niveaux sonores excessifs. Dolan (2006) a également démontré que les niveaux sonores des sifflets de train ajustés selon la méthode globale spécifiée dans la norme ISO 7731 étaient excessifs, et sur la base de données expérimentale, Dolan et Rainey (2005) ont recommandé un rapport S/B de -3 dB pour la perception optimale des sifflets de train.

Ces quelques études n'ont cependant pas pris en considération l'effet du port de protecteurs auditifs, ni le niveau sonore à partir duquel les individus commencent à réagir à l'alarme. Sans protecteurs auditifs (volet 1), les seuils de réaction mesurés sont à un niveau plus bas que la prescription de la norme ISO 9533, donc inférieurs à un rapport S/B de 0 dB. En général, en condition de protection passive (coquilles passives et protecteurs auditifs à rétablissement de son en mode OFF), les seuils de réaction sont au-delà du niveau minimal de la norme ISO 9533 pour les deux alarmes, sauf pour l'alarme à large bande lors de l'utilisation du protecteur de type coquilles. En effet, pour ce type de protecteur, les exigences de la norme sont conformes aux seuils de réaction moyens obtenus pour l'alarme à large bande dans toutes les conditions d'utilisation (OFF, position 1, position 2), alors qu'elles sous-estiment les seuils de retrait pour l'alarme tonale d'environ 2-3 dB en moyenne.

Finalement, les seuils de réaction moyens mesurés avec les bouchons à rétablissement de son en position 1 et en position 2 sont d'une valeur de 0 dB S/B ou moins pour les deux alarmes, conformément à la norme ISO 9533. La différence entre les deux types de protecteurs auditifs à rétablissement de son pourrait encore une fois être expliquée, du moins en partie, par les valeurs de gain notées au Tableau 1. En effet, les bouchons offrent un gain positif (amplification) alors que les coquilles offrent principalement un gain négatif (atténuation) par rapport à la condition avec oreilles non couvertes.

Il en résulte donc que les seuils de retrait obtenus sont en adéquation avec les exigences de la norme sans protecteurs auditifs pour les deux alarmes, avec les bouchons à rétablissement de son pour les deux alarmes, et avec les coquilles à rétablissement de son pour l'alarme à large bande. Des ajustements du niveau de l'alarme supérieurs à 0 dB seraient toutefois nécessaires lors de l'utilisation de protection passive ou de protecteurs à rétablissement de son (du moins pour l'alarme tonale) pour assurer une réaction adéquate au signal avertisseur.

En raison : 1) **de sa simplicité** (nul besoin de connaître a priori les seuils masqués ni le contenu spectral de l'alarme et du bruit), et 2) de la **relative insensibilité du seuil de retrait au type de bruit**, l'utilisation de la norme ISO 9533 pour l'ajustement du niveau sonore des

alarmes de recul sur le terrain pourrait être recommandable. Toutefois, il faudrait inclure toutes les sources de bruit autour du véhicule dans la définition du bruit de fond et ajouter jusqu'à 7 dB additionnels 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**.

4.3.3 Autres considérations

Dans la présente démarche expérimentale, 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.

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

Quoique l'ajustement optimal du niveau des alarmes de recul soit important pour assurer la sécurité derrière les véhicules lourds, les travailleurs doivent également être en mesure de bien localiser la provenance de la source sonore afin de s'éloigner rapidement de la zone de danger. Des accidents mortels pourraient survenir (même si l'alarme est bien ajustée et positionnée de façon optimale sur le véhicule lourd), si la localisation sonore est compromise en raison des caractéristiques acoustiques de l'alarme et du milieu ambiant, des capacités auditives des travailleurs, du port de protecteurs auditifs, de la présence de multiples alarmes dans le milieu de travail, et des ressources cognitives des travailleurs investis dans ses tâches.

Dans ce chapitre, seuls les effets des caractéristiques acoustiques de l'alarme et le port de protecteurs auditifs sur la localisation sonore sont abordés. Sur la base de l'état des connaissances (section 2.0), il est anticipé que l'alarme à large bande soit plus facile à localiser que l'alarme tonale, en raison de son contenu spectral plus étendu. Par ailleurs, les protecteurs auditifs de types coquilles nuiront davantage à la localisation sonore que ceux de type bouchons. Finalement, la localisation sonore avec les protecteurs à rétablissement de sons ajustés aux différentes positions de volume ne sera pas améliorée comparativement à la performance en mode OFF. En effet, en raison du positionnement du microphone à l'extérieur de l'oreille, les indices utiles à la localisation sonore, particulièrement dans le plan avant/arrière, risquent d'être perturbés.

5.1 Méthodologie

5.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruit

Les deux alarmes décrites à la sous-section 4.1.1, soit l'alarme tonale et l'alarme à large bande, ont été utilisées dans les mesures de localisation auditive. Chaque alarme avait une durée d'un cycle complet (0,990 s pour l'alarme tonale et 0,770 s pour l'alarme à large bande) et était présentée aléatoirement 2 à 8 secondes après l'introduction du bruit de fond (bruit d'une scierie de 80 dBA décrit à la sous-section 4.1.1). Un seul bruit de fond a été utilisé pour cette expérimentation, soit le bruit de copeaux de bois dans une scierie. Cette décision de ne retenir qu'un seul bruit a dû être prise afin de limiter le nombre de conditions à tester et se concentrer sur les comparaisons d'intérêt pour l'étude, soient celles entre les deux alarmes et celles entre les différentes conditions de protection. Ce bruit a été retenu pour la richesse de son contenu fréquentiel et temporel (voir figure 3 et figure 4). Le niveau sonore des alarmes a été ajusté afin d'obtenir un rapport S/B de 0 dB dans la portion « on » (portion durant laquelle un signal est émis) de l'alarme.

La durée des alarmes a été limitée à un cycle afin de représenter une situation critique pour laquelle le temps de dégagement derrière le véhicule est très court.

5.1.2 Participants

Au total, 144 adultes (91 femmes et 53 hommes) âgés de 18 à 39 ans ont participé aux expérimentations menées en laboratoire et portant sur la localisation d'alarmes de recul en présence d'un bruit, lors du port ou non de protecteurs auditifs passifs ou à rétablissement de son. Tous les participants respectaient les critères de sélection suivants : 1) sensibilité auditive normale des 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 cm³; volume du conduit auditif externe = 0,9 – 2,0 cm³; gradient = 51 – 114 daPa; pression = -150 à +50 daPa) (Martin et Clark, 2003).

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 H09-13-01). Afin de s'assurer que les participants satisfaisaient aux critères de sélection, un otoscope Welch Allyn a été utilisé pour visualiser le conduit auditif externe et le tympan, alors qu'un tympanomètre GSI 38 a permis d'évaluer l'intégrité de l'oreille moyenne. Finalement, un dépistage auditif a été effectué à l'aide d'un audiomètre portable (Interacoustics AD25) couplé à des écouteurs Telephonics TDH-39P. Lors de ce dernier test, des sons de différentes fréquences (entre 250 et 8000 Hz) ont été présentés sous écouteurs et les participants devaient appuyer sur un bouton-poussoir lorsqu'ils percevaient le son.

5.1.3 Procédures expérimentales

Dans une première série d'essais, 72 participants (âge moyen = 24,7 ans; é.t. = 4.0) divisés en trois groupes égaux ont été évalués sans et avec protecteurs auditifs : 1) bouchons passifs (EAR Ultrafit; IRB = 25 dB), 2) coquilles passives (PELTOR Optime 95; IRB = 21 dB), 3) double protection (bouchons passifs portés sous les coquilles passives). Dans la seconde série d'essais, trois groupes de 24 participants (âge moyen = 24,0 ans; é.t. = 3,3) ont été évalués sans et avec protecteurs auditifs : 1) bouchons à rétablissement de son [3M PELTOR Tactical Earplug (IRB = 23 dB)], 2) coquilles à rétablissement de son [3M PELTOR Protac III (IRB = 26 dB)], 3) un second modèle de coquilles à rétablissement de son [Howard Leight IMPACT H (IRB = 21 dB)]. L'amplification offerte par les protecteurs auditifs à rétablissement de son à deux positions différentes du contrôle de volume est décrite au Tableau 1 de la sous-section 4.1.4.

Dans une cabine audiométrique, les participants devaient se tenir debout, les pieds fixes au sol, au milieu d'un cercle formé de huit haut-parleurs espacés uniformément sur 360 degrés (voir Figure 9) et ayant un radius d'un mètre. La tâche de localisation consistait à identifier le numéro du haut-parleur ayant émis l'alarme sonore en présence du bruit d'une scierie présenté simultanément par tous les haut-parleurs 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. Une tablette électronique fixée à un trépied et placée directement devant les participants servait à compléter une tâche connexe. Le logiciel EBL *Psychological Test Battery*, disponible en ligne gratuitement (<http://pebl.sourceforge.net/battery.html>), a été utilisé pour administrer cette tâche. Le Tower of London Test, un test

couramment utilisé en neuropsychologie pour l'évaluation des fonctions exécutives du processus de planification, a été retenu parmi les tests disponibles dans la batterie PEBL, puisqu'il pouvait s'effectuer entièrement à partir de l'écran tactile d'une tablette électronique et ne nécessitait ni mots ni chiffres. La tâche consistait à reproduire, à l'aide d'une série de disques de différentes couleurs, un patron donné. La Figure 10 illustre un exemple avec six disques. L'individu devait manipuler, en différentes étapes, les disques situés au bas de la figure 9 afin de reproduire le patron au haut de celle-ci. L'effet de la tâche connexe sur la localisation sonore n'est pas un facteur d'analyse dans ce projet puisque les résultats obtenus dans l'étude précédente [[Rapport R-977](#) (Nélisse *et al.*, 2017)] n'ont pas démontré d'effet important. La tâche connexe a tout de même été conservée dans la présente étude, par choix écologique et pour assurer un minimum de charge cognitive durant l'expérimentation.

L'audibilité des alarmes et la compréhension des tâches (localisation auditive et tâche connexe) ont été vérifiées avant les mesures expérimentales, lors d'une période de familiarisation. Malgré que les pieds devaient rester fixes au sol, les mouvements de la tête et du haut du corps étaient permis. Aucune stratégie pour aider à localisation sonore n'a été discutée avec les participants.



Figure 9. Positionnement des haut-parleurs, du participant et du trépied (tâche connexe) pour les épreuves de localisation.

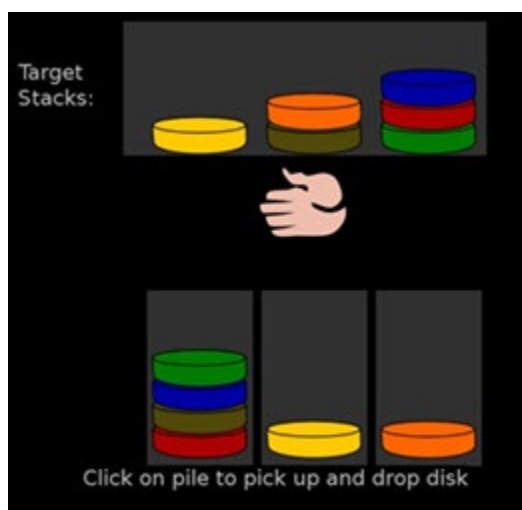


Figure 10. Tâche connexe accomplie par les participants – *Tower of London Test*.

Les participants devaient identifier la source de l'alarme de recul dans quatre conditions d'écoute, telles que décrites au Tableau 4 pour chaque série d'essais. Un pourcentage de réussite a été déterminé séparément pour chaque type d'alarme dans chacune des conditions d'écoute, pour un total de huit conditions expérimentales (2 alarmes x 4 conditions d'écoute) durant lesquelles 36 signaux d'alarme ont été présentés aléatoirement par le biais des huit haut-parleurs

Tableau 4. Conditions d'écoute pour les deux séries d'essais en localisation sonore

Première série d'essais (protecteurs auditifs passifs)	Deuxième série d'essais (protecteurs auditifs à rétablissement de son)
Sans protection	Sans protecteurs auditifs avec casque de sécurité
Casque de sécurité seulement	Protecteurs auditifs en mode OFF et casque de sécurité
Protecteurs auditifs seulement	Protecteurs auditifs en position 1 et casque de sécurité
Protecteurs auditifs et casque de sécurité	Protecteurs auditifs en position 2 et casque de sécurité

5.2 Résultats – Pourcentage de réussite

Dans les deux séries d'essais, la performance en localisation auditive a été calculée selon le pourcentage de réussite ($\#$ de haut-parleurs correctement identifiés/36 présentations x 100) pour chacune des 8 conditions expérimentales.

5.2.1 *Protecteurs passifs*

Des analyses statistiques ont été effectuées séparément pour chaque groupe de participants (bouchons passifs, coquilles passives et double protection), à l'aide d'une ANOVA pour mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : type d'alarme (2 niveaux : alarmes tonales et à large bande) et conditions d'écoute (4 niveaux : sans protection (oreilles nues), casque de sécurité seulement, protecteurs auditifs seulement (bouchons passifs) et protecteurs auditifs et casque de sécurité). Les pourcentages de réussite moyens sont présentés à la Figure 11 (bouchons passifs), la Figure 12 (coquilles passives) et la Figure 13 (double protection). Dans les situations lors desquelles un effet significatif a été obtenu, des comparaisons multiples de type test t (avec un alpha de 0,05) ont permis de déterminer plus précisément les différences entre les niveaux des facteurs.

5.2.1.1 Groupe 1 – bouchons passifs EAR Ultrafit

La Figure 11 présente les pourcentages de réussite dans chacune des conditions d’écoute lors du port de bouchons passifs, séparément pour l’alarme tonale et l’alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d’alarme [$F(1,23) = 198,26, p < 0,001$] et pour la condition d’écoute [$F(3,69) = 12,04, p < 0,001$], ainsi qu’une interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 4,24, p = 0,008$].

En raison de la présence d’une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d’évaluer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d’écoute. La performance en localisation sonore s’est avérée supérieure pour l’alarme à large bande comparativement à l’alarme tonale dans toutes les conditions d’écoute [sans protection : $t(23) = 11,46, p < 0,001$; casque de sécurité seulement : $t(23) = 9,43, p < 0,001$; protecteurs auditifs seulement : $t(23) = 8,22, p < 0,001$; utilisation combinée des protecteurs auditifs et du casque de sécurité : $t(23) = 7,33, p < 0,001$], avec des différences entre alarmes variant de 23 % dans la condition de protection combinée (protecteurs auditifs et casque de sécurité) à 37 % dans la condition sans protection.

Une ANOVA à mesures répétées sur le facteur condition d’écoute a révélé un effet significatif pour l’alarme à large bande [$F(3,69) = 19,51, p < 0,001$]. Les différences significatives entre conditions d’écoute, telles que déterminées par comparaisons multiples, sont répertoriées au tableau 3. Une ANOVA à mesures répétées sur le facteur condition d’écoute n’a révélé aucun effet significatif pour l’alarme tonale [$F(3,69) 1,25, p = 0,3$].

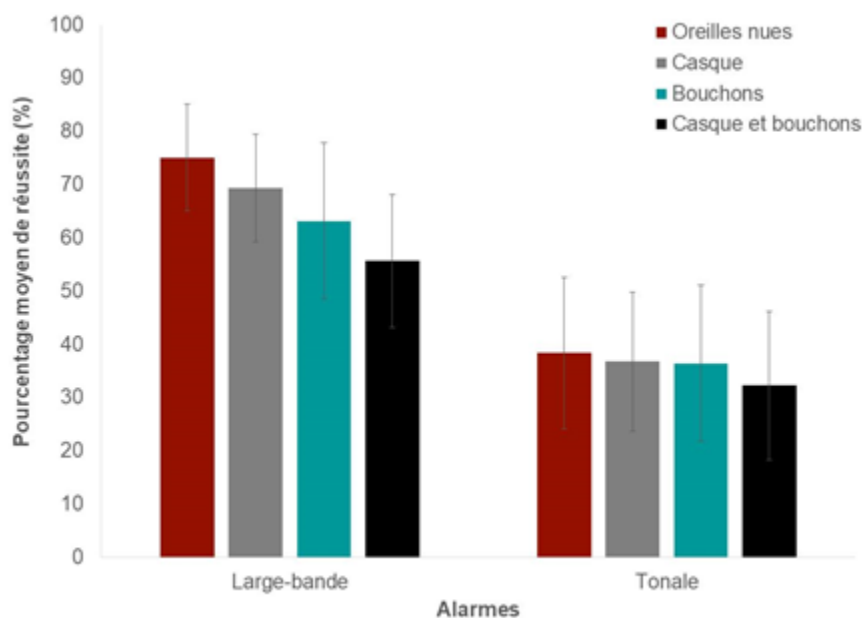


Figure 11. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de bouchons passifs.

Tableau 5. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port de bouchons passifs

Alarme à large bande*
Sans protection > protecteurs seulement (12 %)
Sans protection > protecteurs + casque de sécurité (19 %)
Casque de sécurité seulement > protecteurs + casque de sécurité (14 %)
Protecteurs seulement > protecteurs + casque de sécurité (8 %)

Note : *La taille d'effet est indiquée entre parenthèses.

5.2.1.2 Groupe 2 – coquilles passives 3M PELTOR Optime 95

La Figure 12 expose les pourcentages de réussite dans chacune des conditions d'écoute lors du port de coquilles passives. Les résultats sont présentés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 275,01$, $p < 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 61,29$, $p < 0,001$], mais pas d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 1,620$, $p = 0,193$]. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à celle de l'alarme tonale, avec des différences de 31 à 38 %.

Puisqu'aucune interaction significative entre les deux facteurs (type d'alarme et condition d'écoute) n'a été révélée, des comparaisons multiples entre les différentes paires de condition d'écoute ont été effectuées sur l'ensemble des deux alarmes, les différences significatives étant répertoriées au Tableau 6. Encore une fois, aucune différence significative n'a été notée entre les performances obtenues dans la condition sans protection et lors du port du casque de sécurité utilisé seul.

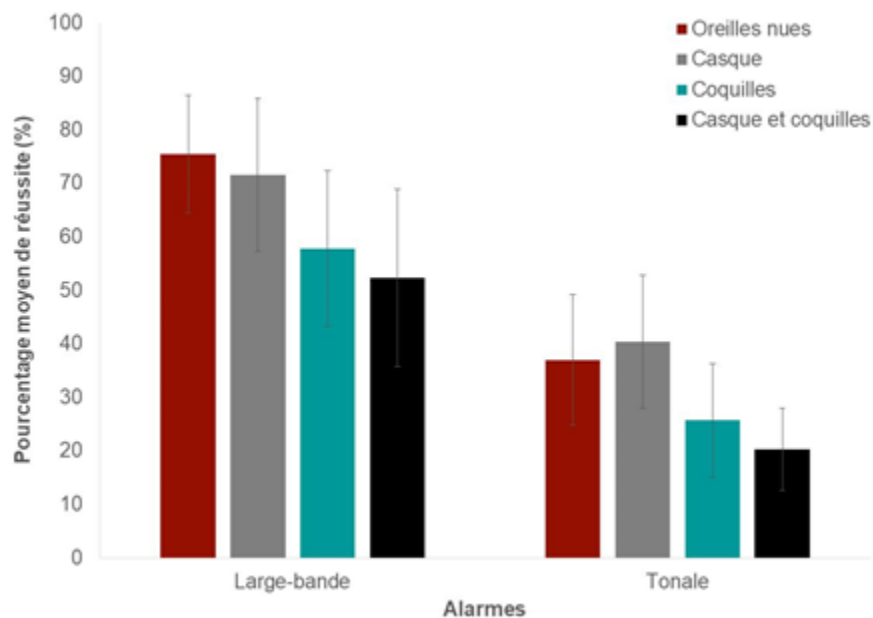


Figure 12. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de coquilles passives.

Tableau 6. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port de coquilles passives

Ensemble des deux alarmes*
Sans protection > protecteurs seulement (15 %)
Sans protection > protecteurs + casque de sécurité (20 %)
Casque de sécurité seulement > protecteurs seulement (14 %)
Casque de sécurité > protecteurs + casque de sécurité (24 %)
Protecteurs seulement > protecteurs + casque de sécurité (5 %)

Note : *La taille d'effet est indiquée entre parenthèses.

5.2.1.3 Groupe 3 – double protection

Finalement, la Figure 13 présente les pourcentages de réussite dans chacune des conditions d'écoute lors du port de la double protection (bouchons passifs + coquilles passives), séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 120,69$, $p < 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 252,63$, $p < 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 61,69$, $p < 0,001$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin de comparer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d'écoute. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à celle de l'alarme tonale dans deux des conditions d'écoute [sans protection : $t(23) = 10,97$, $p < 0,001$; casque de sécurité seulement : $t(23) = 11,05$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs seulement : $t(23) = 2,19$, $p = 0,039$; utilisation combinée des protecteurs auditifs et du casque de sécurité : $t(23) = -0,70$, $p = 0,493$]. Ainsi, l'alarme à large bande a contribué à de meilleures performances en localisation auditive que l'alarme tonale dans les conditions sans protection (différence de 34 %) et lors du port du casque de sécurité seulement (différence de 31 %). Par contre, il n'y a pas d'effet d'alarme dans les deux conditions avec (double) protection, avec ou sans casque de sécurité, les performances en localisation ayant chuté à un niveau proche du niveau de chance ($1/8 = 12,5\%$) pour les deux types d'alarmes (performance variant de 14 à 18 %).

En comparant la performance entre les différentes conditions d'écoute, une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(3,69) = 299.972, p < 0.001$] et pour l'alarme tonale [$F(3,69) = 51.42, p < 0.001$]. Les différences significatives entre conditions d'écoute, telles que déterminées par comparaisons multiples, sont répertoriées Tableau 6.

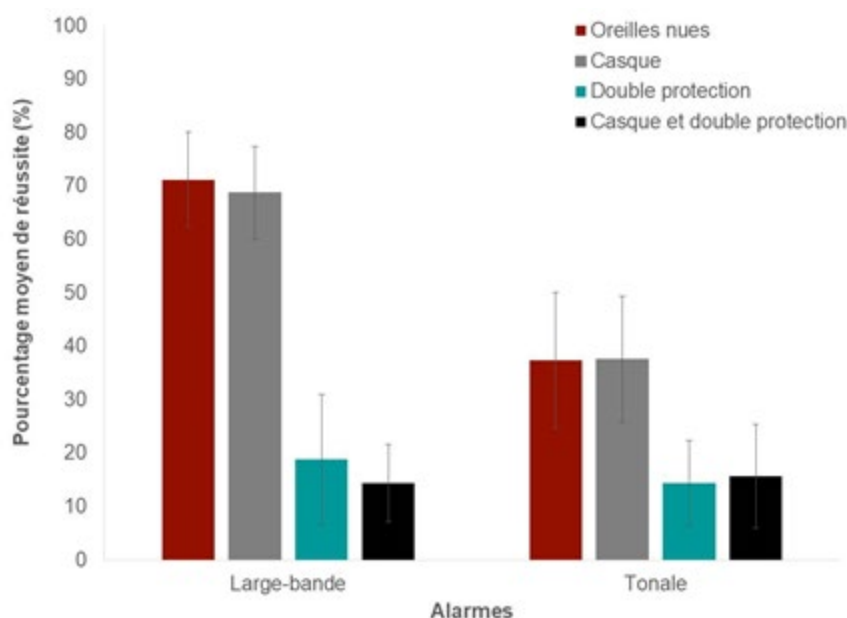


Figure 13. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port d'une double protection (bouchons passifs + coquilles passives).

Tableau 7. Différences statistiquement significatives entre les conditions d'écoute dans le pourcentage de réussite lors du port de double protection (bouchons passifs + coquilles passives)

Alarmes à large bande et tonale, séparément*
Sans protection > double protection (52 % à large bande; 23 % tonale)
Sans protection > double protection + casque de sécurité (57 % à large bande; 22 % tonale)
Casque de sécurité seulement > double protection (50 % à large bande; 23 % tonale)
Casque de sécurité seulement > double protection + casque de sécurité (54 % à large bande; 22 % tonale)

Note : *La taille d'effet est indiquée entre parenthèses.

5.2.1.4 Différences entre les groupes pour les protecteurs auditifs passifs

Afin d'évaluer les différences significatives entre les trois groupes de participants (bouchons passifs, coquilles passives et double protection), une ANOVA mixte à mesures répétées a été effectuée pour les résultats issus uniquement de la condition d'écoute avec protecteurs auditifs seulement, pour laquelle les performances sont présentées à la Figure 14. Les résultats de l'analyse statistique ont révélé un effet principal significatif pour le facteur intrasujets (type d'alarme – 2 niveaux) [$F(1,69) = 166,39$, $p < 0,001$], un effet significatif pour le facteur intersujets (type de protecteurs auditifs – 3 niveaux) [$F(2,69) = 63,60$, $p < 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(2,69) = 26,99$, $p < 0,001$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacun des groupes de participants pour la condition d'écoute avec protecteurs auditifs seulement. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à celle de l'alarme tonale pour le groupe d'utilisateurs des bouchons passifs [$t(23) = 8,216$, $p < 0,001$; différence de 27%], des coquilles passives [$t(23) = 10,453$, $p < 0,001$; différence de 32 %], et de la double protection auditive [$t(23) = 2,193$, $p = 0,039$; différence de 4 %].

En comparant la performance entre les trois groupes d'utilisateurs de protecteurs auditifs passifs (Figure 14), une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(2,69) = 73,53$, $p < 0,001$] la performance moyenne était supérieure avec les bouchons comparativement à la double protection (différence de 44 %), et avec les coquilles comparativement à la double protection (différence de 39 %), alors qu'aucune différence significative n'a été notée entre les bouchons et les coquilles. Une ANOVA a aussi révélé un effet significatif pour l'alarme tonale, avec une performance moyenne supérieure avec les bouchons comparativement aux coquilles (différence de 11 %) et à la double protection (différence de 22 %), et pour les coquilles comparativement à la double protection (différence de 11 %). Des tendances similaires ont été notées lors d'une ANOVA mixte à mesures répétées effectuées pour les résultats issus de conditions d'écoute avec protecteurs auditifs + casque de sécurité.

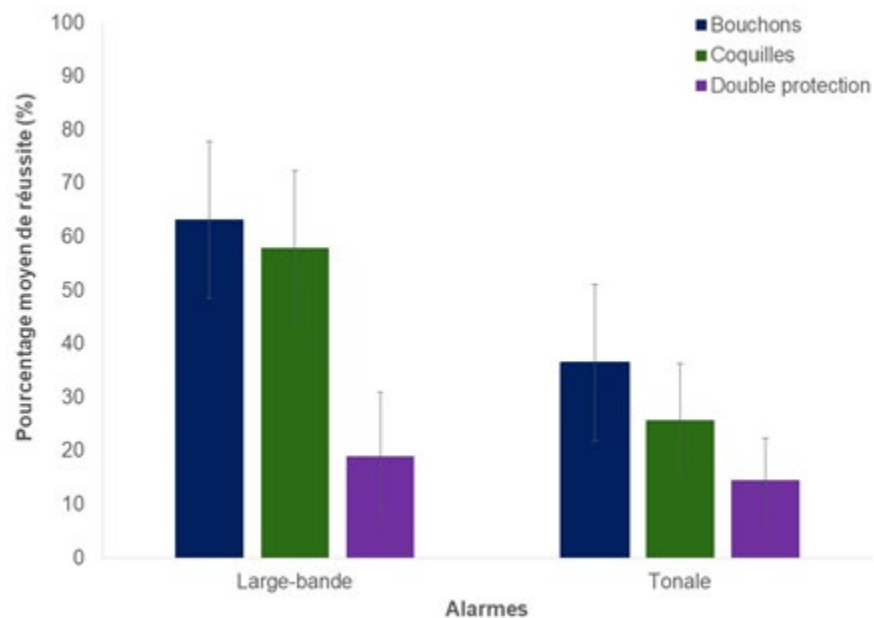


Figure 14. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons passifs, coquilles passives et double protection passive) sans casque de sécurité.

5.2.1.5 Sommaire du pourcentage de réussite – protecteurs passifs

Sur l'ensemble des trois groupes de participants, la performance en localisation sonore dans la condition sans protection était de 74 % pour l'alarme à large bande et de 38 % pour l'alarme tonale. Des résultats similaires ont été obtenus par (Nélisse *et al.*, 2017), soit 83 % et 42 % pour les alarmes à large bande et tonale, respectivement, en utilisant une méthodologie identique.

Conformément aux résultats d'études antérieures (Nélisse *et al.*, 2017; Vaillancourt *et al.*, 2013), l'alarme à large bande offre un certain avantage en localisation sonore comparativement à l'alarme tonale, sauf lors du port de double protecteurs auditifs. En effet, sur l'ensemble de toutes les conditions d'écoute et de tous les groupes de protecteurs auditifs, la différence de performance en localisation sonore entre les deux alarmes variait entre 23 et 38 %, sauf dans le cas de la double protection (sans et avec casque de sécurité) lors de laquelle la performance pour les deux alarmes a chuté à un niveau presque équivalent à celui de la chance.

Également en conformité avec la littérature scientifique, les protecteurs passifs ont nui à la localisation sonore. En effet, la performance en localisation était significativement plus faible lors du port de protecteurs auditifs passifs que sans protection (avec des différences variant de 12 à 52 %), sauf lorsque les bouchons passifs étaient utilisés en présence de l'alarme tonale. La double protection s'est avérée être la plus nuisible en réduisant la performance à un niveau similaire à celui de la chance. Finalement, il semblerait que les coquilles passives nuisent davantage à la localisation sonore que les bouchons passifs, du moins pour l'alarme tonale.

Sans protecteurs auditifs, l'utilisation d'un casque de sécurité n'a pas eu d'effet significatif sur la localisation sonore. Avec protecteurs, l'utilisation du casque de sécurité a eu un faible effet de 5

à 8 % dans seulement certaines conditions d'écoute (bouchons passifs en présence de l'alarme à large bande et coquilles passives en présence des deux types d'alarmes). Cependant, cet effet est beaucoup moins appréciable que celui lié au port de protecteurs. Afin de réduire le nombre de conditions expérimentales et de se placer dans les conditions les plus exigeantes au regard de la sécurité des travailleurs, il a donc été décidé d'inclure le casque de sécurité dans toutes les conditions expérimentales dans la seconde série d'essais portant sur les protecteurs auditifs à rétablissement de son.

5.2.2 Protecteurs à rétablissement de son

Des analyses statistiques ont été effectuées séparément pour chaque groupe de participants (bouchons 3M PELTOR Tactical Earplug, coquilles 3M PELTOR Protac III et coquilles Howard Leight IMPACT H), à l'aide d'une ANOVA pour mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : type d'alarme (2 niveaux : alarmes tonale et à large bande) et conditions d'écoute (4 niveaux : sans protecteurs auditifs, protecteurs auditifs en mode OFF, protecteurs auditifs en mode de rétablissement de son avec protecteur en position 1, et protecteurs auditifs en mode de rétablissement de son avec protecteur en position 2). Les pourcentages de réussite moyens sont présentés à la Figure 15 (bouchons 3M tactical earplugs), la Figure 16 (coquilles 3M Protac III) et la Figure 17 (coquilles Howard Leight IMPACT H). Dans les situations où un effet significatif a été obtenu, des comparaisons multiples de type test t (avec un alpha de 0,05) ont permis de déterminer plus précisément les différences entre les niveaux des facteurs.

5.2.2.1 Groupe 1 – bouchons 3M PELTOR Tactical

La figure 15 présente les pourcentages de réussite dans chacune des conditions d'écoute lors du port de bouchons à rétablissement de son 3M PELTOR Tactical; les résultats sont affichés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 474,7$, $p < 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(2,60.6) = 10,2$, $p < 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 3,8$, $p = 0,015$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d'écoute. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à celle de l'alarme tonale dans toutes les conditions d'écoute [sans protecteurs auditifs : $t(23) = 17,3$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en mode OFF : $t(23) = 18,5$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en position 1 : $t(23) = 10,6$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en position 2 : $t(23) = 13,0$, $p < 0,001$], par des différences entre alarmes variant de 29 % dans la condition des protecteurs en position 1 jusqu'à 35 % dans la condition sans protecteurs auditifs.

En comparant la performance entre les différentes conditions d'écoute, une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(2,0,46.4) = 11,1$, $p < 0,001$]. Une ANOVA a également montré un effet significatif pour l'alarme tonale [$F(3,69) = 4,8$, $p = 0,004$]. Les différences significatives sont répertoriées au Tableau 8.

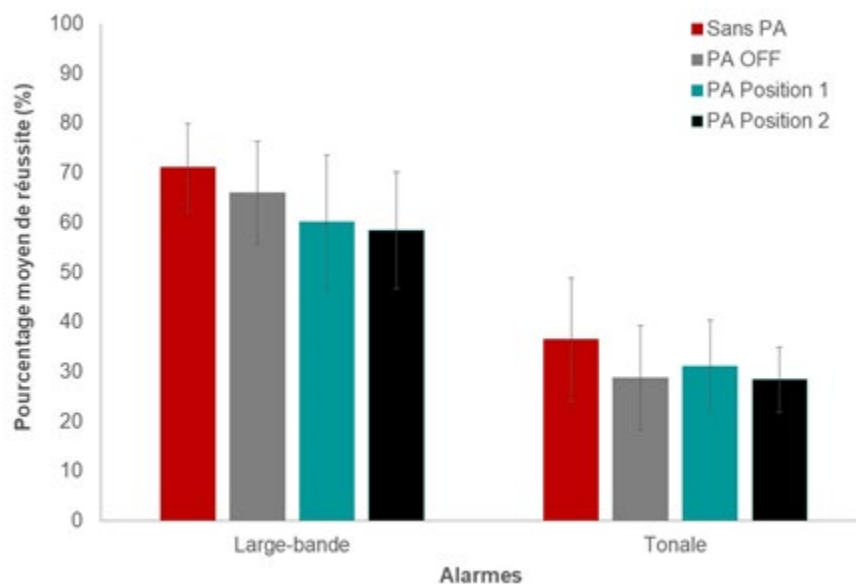


Figure 15. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug.

Note : Sans PA : Sans protecteurs auditifs; PA OFF : Protecteurs auditifs en mode OFF; PA Position 1 : Protecteurs auditifs en position 1; PA Position 2 : Protecteurs auditifs en position 2.

Tableau 8. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug

Alarme à large bande*	Alarme tonale*
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en mode OFF (5 %)	Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en mode OFF (8 %)
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 1 (11 %)	-
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 2 (13 %)	Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 2 (8 %)
Protecteurs auditifs en mode OFF > protecteurs auditifs en position 2 (8 %)	-

Note : * La taille d'effet est indiquée entre parenthèses.

5.2.2.2 Groupe 2 – coquilles 3M PELTOR Protac III

La Figure 16 expose les pourcentages de réussite dans chacune des conditions d'écoute lors du port de coquilles à rétablissement de son 3M PELTOR Protac III; les résultats sont présentés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 218,7$, $p < 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 41,3$, $p < 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 6,7$, $p < 0,001$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d'écoute. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale dans toutes les conditions d'écoute [sans protecteurs auditifs : $t(23) = 12,4$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en mode OFF : $t(23) = 5,3$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en position 1 : $t(23) = 6,7$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en position 2 : $t(23) = 11,1$, $p < 0,001$], par des différences entre alarmes variant de 19 % dans la condition des protecteurs en mode OFF jusqu'à 37 % dans la condition sans protecteurs auditifs.

En comparant la performance entre les différentes conditions d'écoute, une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(3,69) = 34,2$, $p < 0,001$]. Une ANOVA a aussi démontré un effet significatif pour l'alarme tonale [$F(3,69) = 9,2$, $p < 0,001$]. Les différences significatives sont répertoriées au Tableau 9.

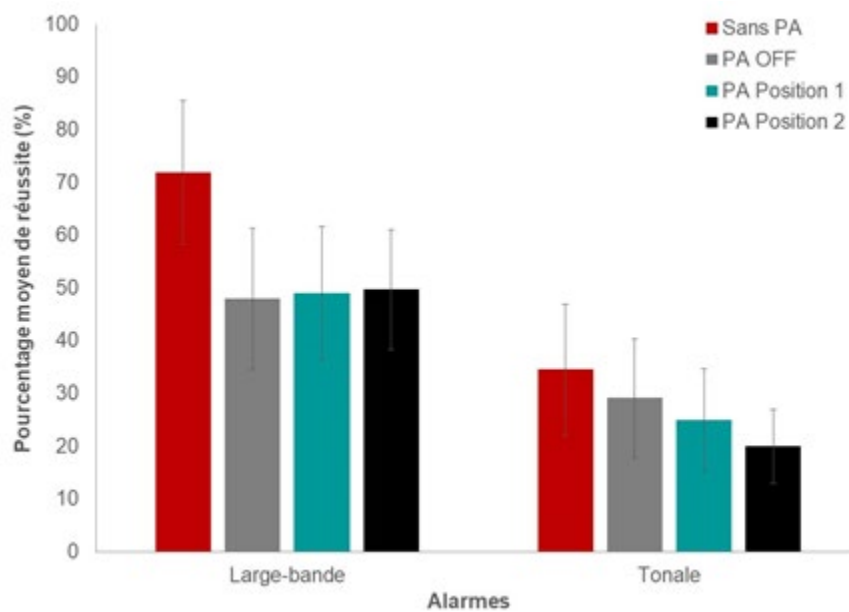


Figure 16. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son 3M Tactical Protac III.

Note : Sans PA : Sans protecteurs auditifs; PA OFF : Protecteurs auditifs en mode OFF; PA Position 1 : Protecteurs auditifs en position 1; PA Position 2 : Protecteurs auditifs en position 2.

Tableau 9. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d'écoute lors du port des coquilles à rétablissement de son 3M Tactical Protac III

Alarme à large bande*	Alarme tonale*
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en mode OFF (24 %)	-
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 1 (23 %)	Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 1 (10 %)
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 2 (22 %)	Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 2 (15 %)
-	Protecteurs auditifs en mode OFF > protecteurs auditifs en position 2 (9 %)

Note : * La taille d'effet est indiquée entre parenthèses.

5.2.2.3 Groupe 3 – coquilles Howard Leight IMPACT H

La figure 17 présente les pourcentages de réussite dans chacune des conditions d'écoute lors du port de coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H; les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 330,5$, $p < 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(2,3,52.3) = 19,3$, $p < 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 10,9$, $p < 0,001$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d'écoute. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale dans toutes les conditions d'écoute [sans protecteurs auditifs : $t(23) = 12,0$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en mode OFF : $t(23) = 5,6$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en position 1 : $t(23) = 8,0$, $p < 0,001$; protecteurs auditifs en position 2 : $t(23) = 10,1$, $p < 0,001$, par des différences entre alarmes variant de 17 % dans la condition des protecteurs en mode OFF jusqu'à 38 % dans la condition sans protecteurs auditifs. En comparant la performance entre les différentes conditions d'écoute, une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(2,1,47.1) = 22,7$, $p < 0,001$]. Une ANOVA a aussi démontré un effet significatif pour l'alarme tonale [$F(3,69) = 3,6$, $p = 0,018$]. Les différences significatives sont répertoriées au Tableau 7.

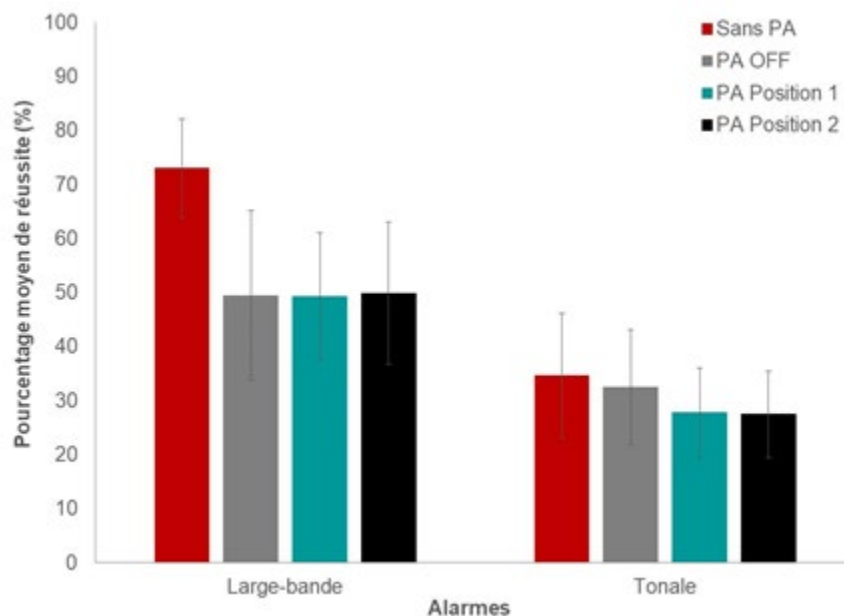


Figure 17. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H.

Note : Sans PA : Sans protecteurs auditifs; PA OFF : Protecteurs auditifs en mode OFF; PA Position 1 : Protecteurs auditifs en position 1; PA Position 2 : Protecteurs auditifs en position 2.

Tableau 10. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de réussite entre les conditions d’écoute lors du port des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H

Alarme à large bande*	Alarme tonale*
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en mode OFF (24 %)	-
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 1 (24 %)	Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 1 (7 %)
Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 2 (23 %)	Sans protecteurs auditifs > protecteurs auditifs en position 2 (7 %)

Note : * La taille d’effet est indiquée entre parenthèses.

5.2.2.4 Différences entre les groupes pour les protecteurs auditifs à rétablissement de son

Une ANOVA mixte à mesures répétées a été effectuée pour les résultats issus uniquement de la condition d’écoute avec protecteurs auditifs en mode OFF. Les résultats de l’analyse statistique ont révélé un effet principal significatif pour le facteur intrasujets (type d’alarme – 2

niveaux) [$F(1,69) = 206,9$, $p < 0,001$], un effet significatif pour le facteur intersujets (type de protecteurs auditifs – 3 niveaux) [$F(2,69) = 5,3$, $p = 0,007$], ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(2,69) = 14,4$, $p < 0,001$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacun des groupes de participants pour la condition d'écoute avec protecteurs auditifs en mode OFF. La performance en localisation sonore s'est avérée supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale pour le groupe d'utilisateurs des bouchons 3M PELTOR Tactical [$t(23) = 18,5$, $p < 0,001$; différence de 37 %] pour le groupe d'utilisateurs des coquilles 3M PELTOR Protac III [$t(23) = 5,3$, $p < 0,001$; différence = 19 %] et pour les utilisateurs des coquilles Howard Leight IMPACT H [$t(23) = 5,6$, $p < 0,001$; différence = 17 %].

En comparant la performance entre les trois groupes d'utilisateurs de protecteurs auditifs à rétablissement de son (Figure 18), une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(2,69) = 13,5$, $p < 0,001$], la performance étant supérieure avec les bouchons 3M PELTOR Tactical comparativement aux deux autres types de protecteurs de type coquilles (différence de 17-18 %), ces deux derniers menant à des performances similaires. Par contre, une ANOVA n'a pas révélé d'effet significatif pour l'alarme tonale [$F(2,69) = 0,8$, $p = 0,444$].

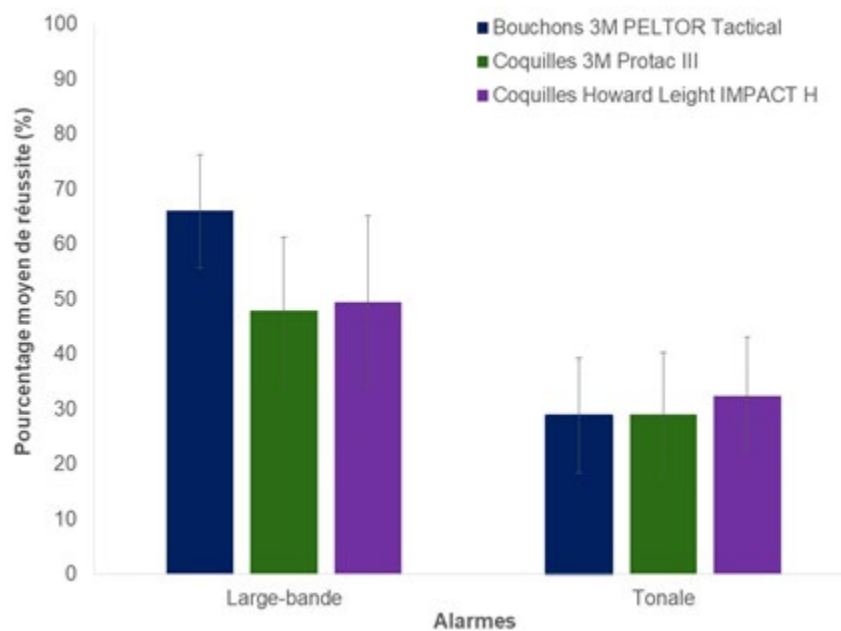


Figure 18. Pourcentages de réussite moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles à rétablissement de sons) dans la condition d'écoute avec les protecteurs auditifs en mode OFF.

5.2.2.5 Sommaire du pourcentage de réussite – protecteurs à rétablissement de son

Sans protecteurs auditifs, la performance moyenne en localisation sur l'ensemble des groupes était de 72 % pour l'alarme à large bande et de 35 % pour l'alarme tonale; des résultats comparables à ceux obtenus dans la première série d'essais auprès du groupe d'utilisateurs de protecteurs passifs 1 (74 % pour l'alarme à large bande par rapport à 38 % pour l'alarme tonale). En effet, une performance supérieure pour l'alarme à large bande a systématiquement été notée, avec des différences moyennes entre les deux alarmes variant de 17 à 37 % sur l'ensemble des conditions d'écoute et des groupes de protecteurs auditifs.

En mode OFF, les bouchons semblaient moins nuire à la localisation sonore que les coquilles, du moins pour l'alarme à large bande. Des comparaisons entre les différents groupes de protecteurs auditifs ont révélé une performance généralement plus précise pour les bouchons à rétablissement de son comparativement aux deux types de coquilles à rétablissement de son pour l'alarme à large bande, alors qu'aucune différence significative entre les groupes n'a été notée pour l'alarme tonale. Ce résultat est différent de celui obtenu de la première série d'essais avec les protecteurs passifs, où une différence entre les bouchons et les coquilles avait uniquement été notée dans le cas de l'alarme tonale.

Il est intéressant de noter que malgré qu'aucune différence statistiquement significative ne fut observée entre la condition des protecteurs en mode OFF et celle avec les protecteurs en position 1, pour tous les types de protecteurs à rétablissement de son, le mode OFF s'est avéré significativement supérieur à la position 2 dans certaines conditions d'écoute (bouchons 3M PELTOR Tactical pour l'alarme à large bande et coquilles 3M PELTOR Protac III pour l'alarme tonale). Il semblerait donc que le mode opérationnel de rétablissement de son (positions 1 et 2) ne restaure pas les capacités de localisation auditive comparativement aux résultats obtenus sans protecteurs auditifs. En effet, la localisation avec les protecteurs en fonction était généralement moins bonne que celle dans la condition sans protecteurs auditifs (sauf pour les bouchons à rétablissement de son en position 1 pour l'alarme tonale) et souvent similaire à celle mesurée dans la condition des protecteurs utilisés en mode OFF.

5.3 Résultats – Pourcentage de confusions avant/arrière (A/A) et gauche/droite (G/D)

Dans les deux séries d'essais, la performance en localisation auditive a également été calculée selon le pourcentage de confusion avant/arrière (# de confusions /36 présentations x 100) pour chacune des 8 conditions expérimentales. Une confusion est comptabilisée lorsque le participant se méprend sur la provenance avant ↔ arrière ou gauche ↔ droite du son de l'alarme. Ces types de confusion revêtent une grande importance pour la sécurité des travailleurs comparativement aux confusions entre deux haut-parleurs adjacents.

Les analyses statistiques sur le pourcentage de confusion (A/A et G/D) ont été effectuées de la même façon que pour les pourcentages de réussite. Pour alléger le texte, ces analyses sont regroupées à l'annexe A : Les sous-sections qui suivent présentent un sommaire des principaux résultats.

5.3.1 Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs passifs

En général, le pourcentage de confusion avant/arrière était plus faible pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale, de 5 à 10 % sur l'ensemble des conditions d'écoute pour les bouchons et les coquilles, respectivement. Une telle observation a également été notée dans le groupe d'utilisateurs de la double protection passive, mais uniquement dans les conditions d'écoute sans protecteurs auditifs. Avec la double protection auditive le pourcentage de confusion avant/arrière moyen pour l'alarme à large bande était similaire (sans casque de sécurité) ou plus élevé (avec casque de sécurité) que celui obtenu avec l'alarme tonale.

Le port de protecteurs auditifs passifs a également contribué à une augmentation du pourcentage de confusion avant/arrière moyen comparativement à la condition sans protection (d'environ 4-7 % pour les bouchons et les coquilles et de 8-14 % pour la double protection avec l'alarme à large bande), sauf dans le cas de la double protection utilisée en présence de l'alarme tonale.

Finalement, le pourcentage de confusion gauche/droite était généralement faible ($\leq 2\%$), mais plus élevé avec l'alarme tonale lors de l'utilisation des bouchons (3-4 %) et des coquilles (9-18 %), et grimpait jusqu'à près de 40 % pour les deux alarmes lors de l'utilisation de la double protection.

5.3.2 Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs à rétablissement de son

Sans protecteurs auditifs, le pourcentage de confusion avant/arrière moyen sur l'ensemble des groupes était de 16 % pour l'alarme à large bande et de 24 % pour l'alarme tonale, des résultats comparables à ceux obtenus dans la première série d'essais auprès des utilisateurs de protecteurs auditifs passifs (15 % pour l'alarme à large bande par rapport à 22 % pour l'alarme tonale). Sauf pour quelques conditions d'écoute (OFF et protecteur en position 1) avec les coquilles Howard Leight IMPACT H lors desquelles une différence entre les deux alarmes ne s'est pas avérée statistiquement significative, le pourcentage de confusion avant/arrière était généralement plus faible pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale, de 4 à 10 % sur l'ensemble des conditions d'écoute et des groupes d'utilisateurs.

L'utilisation de protecteurs auditifs à rétablissement de son ne semble pas avoir augmenté de façon statistiquement significative le pourcentage de confusion avant/arrière, du moins dans le cas des coquilles à rétablissement de son. Pour les bouchons à rétablissement de son, la condition d'écoute en position 2 a contribué à une augmentation dans le taux de confusion avant/arrière d'environ 4 % comparativement aux trois autres conditions d'écoute (sans protection, mode OFF et en position 1). Notons que l'utilisation des protecteurs à rétablissement de son en mode OFF n'a pas contribué à une augmentation du pourcentage de confusion avant/arrière, contrairement à l'effet de 6 % qui avait été noté pour les protecteurs auditifs passifs dans la première série d'essais. Les différences dans la forme géométrique ou dans l'atténuation aux hautes fréquences entre les divers protecteurs pourraient expliquer ce résultat.

Sans protecteurs auditifs, le pourcentage de confusion gauche/droite moyen sur l'ensemble des groupes était nul pour l'alarme à large bande et 1,4 % pour l'alarme tonale, des résultats comparables à ceux obtenus dans la première série d'essais auprès du groupe d'utilisateurs

des protecteurs auditifs passifs 1 (0 % pour l'alarme à large bande par rapport à 1,4 % pour l'alarme tonale). En effet, le pourcentage de confusion gauche/droite était généralement faible (≤ 2 %) dans toutes les conditions d'écoute pour l'alarme à large bande et sans protecteurs auditifs pour l'alarme tonale, mais plus élevé avec l'alarme tonale lors de l'utilisation des bouchons 3M PELTOR Tactical (jusqu'à 4 %), des coquilles 3M PELTOR Protac (6-10 %) et des coquilles Howard Leight IMPACT H (4-6 %).

5.4 Discussion Volet 2 – Effet des protecteurs auditifs sur la localisation sonore

Les équipements de protection personnelle, incluant les protecteurs auditifs et les casques de sécurité, sont couramment utilisés dans plusieurs milieux de travail bruyants et peuvent avoir un impact sur les capacités de localisation sonore.

5.4.1 Résultats principaux

En général, la localisation sonore était plus précise avec l'alarme à large bande qu'avec l'alarme tonale. En effet, sur l'ensemble de tous les groupes d'utilisateurs et les conditions d'écoute des deux séries d'essais combinées, l'alarme à large bande a contribué à un pourcentage moyen de réussite 28% plus élevé, à un pourcentage de confusion avant/arrière moyen 5% plus faible et à un pourcentage de confusion gauche/droite moyen 4% plus faible, comparativement à l'alarme tonale. Ces résultats sont conformes à la littérature indiquant une meilleure localisation sonore dans le cas des signaux dont le spectre est plus large (Butler, 1986; Catchpole et Mckeown, 2007; Makous et Middlebrooks, 1990).

De plus, à l'exception de la condition de double protection dans le groupe d'utilisateurs de protecteurs auditifs passifs, le pourcentage de confusion gauche/droite moyen était très faible pour l'alarme à large bande (≤ 1 %) dans toutes les conditions expérimentales et pour l'alarme tonale dans les conditions d'écoute sans protecteurs auditifs. Pour l'alarme tonale, ce pourcentage a atteint un maximum de 4 % lors du port de bouchons, de 18 % lors du port de coquilles et de 38 % dans le cas de la double protection.

Ainsi, il appert que les erreurs de localisation commises lors des deux séries d'essais (sauf dans le cas de la double protection passive) sont davantage dues à des confusions entre haut-parleurs adjacents et des confusions avant/arrière que des confusions de type gauche/droite. Une augmentation des confusions avant/arrière est conforme à la littérature sur l'effet des protecteurs auditifs sur la localisation sonore (S. M. Abel et Armstrong, 1993; S M Abel et Hay, 1996; K. A. Alali et Casali, 2011; Zimpfer et Sarafian, 2014). Par exemple, Zimpfer et Sarafian (2014) ont évalué les capacités d'individus ayant une audition normale à localiser un bruit à large bande d'une durée de 230 ms lors du port ou non de protecteurs auditifs passifs et de protecteurs auditifs à rétablissement de son. Comparativement à la condition sans protection, une augmentation des erreurs de localisation, particulièrement de types avant/arrière et haut/bas, a été notée lors du port de protecteurs auditifs, surtout dans le cas des protecteurs auditifs à rétablissement de son. Les auteurs avancent que la dégradation de la localisation sonore pourrait être due aux modifications spectrales du signal lors du port des protecteurs auditifs, mises en évidence par une mesure des fonctions de transfert liées à la tête.

Les résultats de la première série d'essais (protecteurs auditifs passifs) ont démontré un effet plus limité sur la localisation sonore du casque de sécurité porté seul comparativement à l'utilisation de protecteurs auditifs. En conformité avec la littérature scientifique, les protecteurs auditifs passifs ont généralement nui à la localisation sonore; l'effet étant plus important pour les coquilles que pour les bouchons (pour l'alarme tonale mais pas pour l'alarme à large bande), la double protection s'avérant être la plus nuisible en réduisant la performance à un niveau similaire à celui de la chance pour les deux types d'alarmes. Généralement, le port de protecteurs auditifs passifs a également contribué à une augmentation du pourcentage de confusion avant/arrière moyen comparativement à la condition sans protection pour les deux alarmes. Finalement, le pourcentage de confusion gauche/droite était généralement faible sans protecteurs auditifs, plus élevé avec les coquilles qu'avec les bouchons pour l'alarme tonale seulement, et grimpait substantiellement pour les deux alarmes lors de l'utilisation de double protection.

Tout comme pour les protecteurs auditifs passifs, les résultats obtenus avec les protecteurs auditifs à rétablissement de son ont démontré que les protecteurs auditifs passifs (mode OFF) nuisent à la localisation sonore comparativement à la condition sans protecteurs auditifs; un effet qui est parfois moins grand pour les bouchons que pour les coquilles (pour l'alarme à large bande mais pas pour l'alarme tonale). En mode de rétablissement de son (positions 1 et 2), les protecteurs ne restauraient généralement pas les performances en localisation sonore comparativement aux résultats obtenus sans protecteurs auditifs et donnaient des résultats souvent similaires ou pires que ceux obtenus en mode OFF. Quoiqu'en général le pourcentage de confusion avant/arrière moyen semblait être plus élevé lors de l'utilisation des protecteurs en mode de rétablissement de son, une différence statistiquement significative a seulement été notée dans certaines conditions pour les bouchons (légère augmentation des confusions avant/arrière avec le protecteur en position 2 comparativement aux trois autres conditions d'écoute : sans protection, mode OFF et protecteur en position 1). Finalement, malgré une présence importante de confusions entre haut-parleurs adjacents et de confusions avant/arrière, le pourcentage de confusion gauche/droite moyen était plutôt limité (même s'il augmentait lors de l'utilisation des bouchons et des coquilles dans le cas de l'alarme tonale seulement).

En résumé, la localisation sonore est supérieure pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale. Lorsque les capacités de localisation sonore sont critiques à la sécurité et à la performance optimale en milieu de travail bruyant, la double protection devrait être évitée et les protecteurs de type bouchons pourraient s'avérer être un meilleur choix que ceux de type coquilles. Finalement, il semblerait que les difficultés de localisation sonore résultent davantage de confusions entre haut-parleurs adjacents et de confusions avant/arrière, les confusions gauche/droite étant plus négligeables (sauf dans le cas de la double protection auditive).

5.4.2 Limites de l'étude

Dans cette étude, des stimuli courts ont été privilégiés. Une durée d'un cycle a été choisie, en espérant une localisation prompte des stimuli et ainsi un dégagement rapide de la zone de danger derrière le véhicule lourd. Nous rappelons qu'une telle durée du signal est trop courte pour permettre une variation dynamique des indices de localisation sonore avec les mouvements du haut du corps et de la tête, qui aurait pu améliorer les performances. Malgré que le choix d'un stimulus bref vise une localisation prompte, le temps de réaction des

participants n'a pas été mesuré. Une telle mesure aurait permis de déterminer si les participants répondent plus rapidement et avec plus de précision à l'alarme à large bande qu'à l'alarme tonale, et si le temps de réaction est suffisant pour permettre une réponse rapide lorsque le temps de dégagement est limité.

6. DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce projet a permis d'évaluer l'audibilité (seuil de détection et seuil de réaction) et la localisation sonore des alarmes tonales et à large bande lors du port de protecteurs auditifs passifs et à rétablissement de son.

Sans protecteurs auditifs, les seuils de détection étaient nettement inférieurs au bruit de fond (rapport S/B moyen de -21 dB pour l'alarme tonale et de -16 dB pour l'alarme à large bande), alors que les seuils de réaction étaient d'environ 4 dB plus faibles que le bruit. Les seuils de réaction sont donc moins sensibles aux effets du type de bruit et du type d'alarme que les seuils de détection. L'atténuation passive (protecteurs passifs et protecteurs à rétablissement de son en mode OFF) n'a pas eu d'effet ou n'a que légèrement amélioré les seuils de détection, mais il a fait augmenter de façon significative les seuils de réaction (d'environ 6 à 9 dB, selon le type d'alarme).

Pour les protecteurs à rétablissement du son, le mode de rétablissement sonore s'est comporté différemment pour les deux types de protecteurs évalués, soit les coquilles et les bouchons. Lorsqu'utilisée au volume maximal, une augmentation du seuil de détection a été notée comparativement au mode OFF et à la condition sans protecteurs auditifs. En ce qui concerne le seuil de réaction, ce dernier était systématiquement plus faible (meilleur) dans la condition sans protecteurs auditifs que lors de l'utilisation des protecteurs auditifs à rétablissement de son. Aucun effet du mode d'utilisation des coquilles à rétablissement de son n'a été noté (résultats similaires pour les modes OFF, protecteur en position 1 et protecteur en position 2), alors que les seuils de réaction mesurés avec les bouchons à rétablissement de son se sont améliorés progressivement en passant du mode OFF au volume maximal (position 2), sans toutefois rejoindre les valeurs sans protecteurs auditifs. Bref, il en résulte que les protecteurs auditifs ont un effet minimal sur les seuils de détection, mais augmentent de façon significative les seuils de réaction. Même si certains protecteurs permettent d'améliorer les seuils de réaction, les valeurs obtenues ne rejoignent pas celles obtenues sans protecteurs auditifs.

Lorsque les seuils de réaction sont comparés aux exigences de la norme ISO 9533 en matière d'ajustement des alarmes de recul, on note qu'elles sont respectées sans protecteurs auditifs et dans la plupart des cas lors de l'utilisation de protecteurs auditifs à rétablissement de son (sauf pour les coquilles à rétablissement sonore en présence de l'alarme tonale), mais qu'elles ne le sont pas lorsque des protecteurs passifs sont utilisés. Afin d'assurer une réaction adéquate aux alarmes de recul, la norme ISO 9533 pourrait donc être utilisée sur le terrain, à la condition que : 1) toutes les sources de bruit soient incluses dans la définition du bruit de fond; 2) que jusqu'à 7 dB soit ajouté lors de l'utilisation de protecteurs auditifs, particulièrement en mode passif.

Il est à noter que dans le volet 1, l'attention des participants se concentrait pleinement sur la tâche de détection et de réaction, et que l'implication dans diverses tâches et la présence de multiples alarmes de recul pourraient avoir un impact sur les seuils obtenus sur le terrain. Aussi, il est difficile de généraliser les résultats à l'étendue des protecteurs auditifs disponibles sur le marché. Comme mentionné précédemment, l'effet observé de deux différents types de protecteurs auditifs à rétablissement de son était différent, surtout en ce qui a trait aux seuils de

réaction. Il est difficile d'expliquer la différence observée entre les deux protecteurs étant donné le peu d'information rendue disponible par les manufacturiers.

Le port de protecteurs auditifs nuit également à la localisation sonore comparativement aux performances notées sans protecteurs auditifs, avec une augmentation du nombre des confusions entre haut-parleurs adjacents et des confusions de type avant/arrière; les confusions de type gauche/droite étant généralement peu fréquentes (sauf lors du port de la double protection auditive). L'alarme à large bande est plus facile à localiser que l'alarme tonale et les protecteurs de type bouchons peuvent offrir un avantage comparativement aux coquilles, du moins dans certaines conditions d'écoute. Les protecteurs auditifs à rétablissement de son ne semblent pas restaurer les performances en localisation sonore aux valeurs obtenues sans protecteurs auditifs, et ils donnent généralement des résultats similaires ou plus pauvres que ceux obtenus avec l'atténuation passive. En mode de rétablissement de son, le signal est capté par un microphone externe situé à une certaine distance de l'ouverture du conduit auditif, soit dans la conque de l'oreille pour un bouchon électronique et sur la surface de la coquille pour un serre-tête. Étant donné la perturbation du champ sonore près de l'oreille due à la présence même du protecteur, une telle capture sonore ne peut en principe qu'appauvrir les indices nécessaires à la localisation des sons comme les différences binaurales de temps d'arrivée et d'intensité sonore et les indices spectraux. Cette situation peut être particulièrement problématique pour la localisation des sons de courte durée, comme dans le deuxième volet de l'étude lors duquel une seule portion « on » d'alarme est présentée. Lorsque les sons sont de plus longue durée, les mouvements de la tête peuvent permettre de résoudre certaines confusions et d'aider à la localisation des sons, mais il n'est pas garanti sur le terrain que les travailleurs aient un tel réflexe et que le temps disponible soit suffisant pour bénéficier de cet effet.

En résumé, malgré que les protecteurs à rétablissement de son ne semblent pas restaurer les performances auditives à des niveaux obtenus sans protecteurs auditifs, ils peuvent offrir certains avantages comparativement aux protecteurs passifs en ce qui a trait au seuil de réaction, mais peuvent par contre nuire davantage à la localisation sonore dans certains cas. Il est à noter que les résultats sont difficiles à généraliser à l'ensemble des protecteurs à rétablissement sonore disponibles sur le marché, puisque seulement quelques-uns ont pu être évalués. On peut en principe s'attendre à différents résultats selon le niveau d'amplification offert et les différents paramètres des circuits de compression (seuils de compression, temps d'attaque et de relâche) pour chaque produit. Il est à noter par ailleurs que ni les seuils d'audition des individus, ni l'atténuation des protecteurs auditifs n'ont été pris en considération dans la présente étude. Les protecteurs auditifs à rétablissement de son pourraient ainsi s'avérer plus avantageux pour les personnes avec une déficience auditive, en compensant partiellement leur perte auditive à certaines fréquences.

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, Brammer et Yu, 2014; Carbonneau, Lezzoum, Voix et Gagnon, 2013). Ce type de produit pourrait éventuellement fournir un deuxième niveau de vigilance pour le travailleur.

7. CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le contexte de l'utilisation des alarmes de recul et des protecteurs auditifs en milieu de travail bruyant, les éléments importants issus des résultats de cette étude sont, sous forme synthétique, les suivants :

- Tout comme lors des études précédentes financées par l'IRSST, l'alarme à large bande s'est avérée supérieure à l'alarme tonale à divers égards. Elle est plus facile à localiser et engendre une réaction de retrait à des rapports S/B inférieurs, avec ou sans protecteurs.
- Les seuils de réaction sont moins sensibles aux caractéristiques du bruit (variations spectrales et temporelles) que les seuils de détection. Cela présente l'avantage de pouvoir utiliser une méthode d'ajustement de l'alarme basée uniquement sur le niveau global du bruit, comme le préconise la norme ISO 9533.
- Si un ajustement du niveau de l'alarme est effectué selon la norme ISO 9533, il est important de :
 1. Ajouter jusqu'à 7 dB au rapport S/B de 0 dB si des protecteurs auditifs sont utilisés. Il est à noter que cette correction n'est valable que pour des individus avec audition normale.
 2. 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 sur lequel l'alarme est installée.
- Pour les protecteurs testés dans cette étude, qu'ils soient en mode passif ou à rétablissement de son, ceux de type bouchons sont meilleurs pour la localisation sonore que ceux de type coquilles. Ce constat ne peut toutefois pas être généralisé à l'ensemble des protecteurs disponibles sur le marché.
- En ce qui concerne les protecteurs à rétablissement de son testés, les résultats sont mitigés. Comparativement au mode passif, le mode à rétablissement de son peut présenter un certain avantage pour les seuils de réaction, mais, en revanche, il dispose de la capacité de mener à des performances de localisation plus faibles. Qui plus est, les protecteurs à rétablissement de son testés ne permettent pas d'atteindre le même niveau de performance que celui auquel on parvient avec les oreilles nues (sans protecteur).
- Le casque de sécurité testé dans le contexte de cette étude a montré peu d'effets sur la localisation sonore comparativement à la condition sans port de casque. L'effet des protecteurs auditifs sur la localisation s'est avéré beaucoup plus important que le port du casque en soi.

7.1 Portée et limites des résultats

Finalement, les auteurs de cette étude n'ont pas la prétention d'avoir couvert tous les aspects pouvant affecter la perception des alarmes de recul en milieu de travail bruyant. Puisque la perte auditive est fréquente dans les milieux de travail bruyants pour lesquels le port de protecteurs auditifs est requis, des études similaires devraient être menées auprès d'individus atteints de surdité. Le prochain projet IRSST/Université d'Ottawa visera justement cette problématique. Par ailleurs, il serait intéressant d'explorer, dans des études ultérieures, l'effet de différentes configurations du casque de sécurité et de différentes tâches connexes sur les capacités de détection/réaction sonores et de localisation sonore. Des distracteurs sonores et visuels pourraient également être considérés. Finalement, il serait intéressant d'ajouter une mesure du temps de réaction des participants dans de telles expérimentations.

RÉFÉRENCES

- Abel, S. M. et Armstrong, N. M. (1993). Sound localization with hearing protectors. *The Journal of Otolaryngology*, 22(5), 357-363.
- Abel, S. M. et Hay, V. H. (1996). Sound localization : The interaction of aging, hearing loss and hearing protection. *Scandinavian Audiology*, 25(1), 3-12.
- Abel, S. M., Boyne, S. et Roesler-Mulrone, H. (2009). Sound localization with an army helmet worn in combination with an in-ear advanced communications system. *Noise and Health*, 11(45), 199. doi: 10.4103/1463-1741.56213
- 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* (Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA).
- Alali, K. A. et 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 and Health*, 13(51), 99. doi: 10.4103/1463-1741.77202
- Alali, K. et Casali, J. G. (2012). Auditory backup alarms: distance-at-first-detection via in-situ experimentation on alarm design and hearing protection effects. *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 41(supplement 1), 3599–3607.
- ANSI. (2017). *Procedure for the computation of loudness of steady sounds*. ANSI S1.4-2007. Washington, WA: American National Standard.
- Atherley, G. R. C. et Noble, W. G. (1970). Effect of ear-defenders (ear-muffs) on the localization of sound. *British Journal of Industrial Medicine*, 27(3), 260–265.
- Berger, E. H. et Casali, J. G. (1997). Hearing protection devices. Dans M. J. Crocker (édit.), *Encyclopedia of acoustics* (1^{ère} éd., p. 967-981). New-York, NY: John Wiley and Sons.
- Bernstein, E. R., Brammer, A. J. et Yu, G. (2014). Augmented warning sound detection for hearing protectors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1). doi: 10.1121/1.4835135
- Blouin, S. (2005). *Bilan de connaissances sur les dispositifs de détection de personnes lors des manoeuvres de recul des véhicules dans les chantiers de construction* (Rapport n° B-067). Montréal, QC IRSST.
- Bolia, R. S., D'Angelo, W. R., Mishler, P. J. et Morris, L. J. (2001). Effects of hearing protectors on auditory localization in azimuth and elevation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(1), 122-128. doi:10.1518/001872001775992499
- Butler, R. A. (1986). The bandwidth effect on monaural and binaural localization. *Hearing Research*, 21(1), 67-73. doi:10.1016/0378-5955(86)90047-X
- Carbonneau, M.-A., Lezzoum, N., Voix, J. et Gagnon, G. (2013). Detection of alarms and warning signals on an digital in-ear device. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 43(6), 503-511.
- Casali, J. G. et Alali, K. A. (2010). *Etymotic EB-15 (Lo position) BlastPLG evaluation: Backup alarm localization Appended experiment*.(Rapport n° 6/9/10-2-HP). Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Casali, J. G., Robinson, G. S., Dabney, E. C. et Gauger, D. (2004). Effect of electronic ANR and conventional hearing protectors on vehicle backup alarm detection in noise. *Human Factors*, 46(1), 1-10.

- Casali, J. G. et Wright, W. H. (1995). Do amplitude-sensitive hearing protectors improve detectability of vehicle backup alarms in noise. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 39(15), 994–998.
- Catchpole, K. et Mckeown, D. (2007). A framework for the design of ambulance sirens. *Ergonomics*, 50(8), 1287-1301. doi:10.1080/00140130701318780
- CSA. (2014). *Protecteurs auditifs : performances, sélection, entretien et utilisation*. Norme CSA Z94.2-14. Ottawa, ON : CSA.
- Commission de la santé et de la sécurité du travail. (2011). *Revue de presse : le vendredi 9 septembre 2011*. Montréal, QC : CSST.
- Dolan, T.G. (2006). *Perception of train horns*. Communication présentée à 2006 Western Regional Grade-crossing Safety Training Conference. Vancouver, BC.
- Dolan, Thomas G. et Rainey, J. E. (2005). Audibility of train horns in passenger vehicles. *Human Factors*, 47(3), 613-629. doi:10.1518/001872005774859999
- Edworthy, J., Reid, S., Peel, K., Lock, S., Williams, J., Newbury, C. . . . Farrington, M. (2018). The impact of workload on the ability to localize audible alarms. *Applied Ergonomics*, 72, 88-93. doi:10.1016/j.apergo.2018.05.006
- Giguère, C., Laroche, C., Osman, A. et Zheng, Y. (2008). *Optimal installation of audible warning systems in the noisy workplace*. Communication présentée à 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) (Mashantucket, CT. p. 197-204).
- Health and Safety Executive. (2001). *Improving the safety of workers in the vicinity of mobile plant*. (Rapport n° 358). Sudbury, Angleterre: HSE.
- Homer, J. P. (2008). *Audible warning devices used in the mining industry*. Communication présentée à INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Dearborn, MI (p. 678-688).
- ISO. (2003). *Ergonomics: Danger signals for public and work areas Auditory danger signals*. Norme ISO 7731. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2010). *Earth-moving machinery: Machine-mounted forward and reverse audible warning alarm. Sound test method*. Norme ISO 9533. Genève, Suisse: ISO.
- Lancaster, J. A., Alali, K. et Casali, J. G. (2007). 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 Annual Meeting*, 51(20), 1421-1424. doi: 10.1177/154193120705102010
- Laroche, C., Ross, M.-J., Lefebvre, L. et Larocque, R. (1995). *Détermination des caractéristiques optimales des alarmes de recul*. (Rapport n° R-117). Montréal, QC: IRSST.
- Lovejoy, S. M. (2008). *Determination of backup alarm masked threshold in construction noise* (Mémoire de maîtrise, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA).
- Makous, J. C. et Middlebrooks, J. C. (1990). Two-dimensional sound localization by human listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(5), 2188-2200.
- Martin, F. N. et Clark, J. G. (2003). *Introduction to audiology* (8^e éd.). Boston, MA: Allyn & Bacon.
- May, K. R. et Walker, B. N. (2017). The effects of distractor sounds presented through bone conduction headphones on the localization of critical environmental sounds. *Applied Ergonomics*, 61, 144-158. doi:10.1016/j.apergo.2017.01.009
- McKinley, R. L. (2000). *Communication and localization with hearing protectors*. Communication présentée à Damage Risk from Impulse Noise, Aberdeen, MD.

- Melzer, J., Scharine, A. A. et Amrein, B. (2017). Soldier auditory situation awareness: The effects of hearing protection, communications headsets, and headgear. Dans P. Savage-Knepshield, J. Martin, J. Lockette et L. Allender, *Designing soldier systems* (1^é éd., ch. 9). Londres, Angleterre: CRC Press.
- Merat, N. et Groeger, J. A. (2003). Working-memory and auditory localization: Demand for central resources impairs performance. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56(3), 531-549. doi:10.1080/02724980244000521
- Mlynski, R. et 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.
- Murphy, S., Spence, C. et Dalton, P. (2017). Auditory perceptual load: A review. *Hearing Research*, 352, 40-48. doi:10.1016/j.heares.2017.02.005
- Murray, W., Mills, J. et Moore, P. (1998). *Reversing accidents in UK. transport fleets 1996-97*. Huddersfield, Angleterre : Transport and Logistics Research Unit, University of Huddersfield.
- Nélisse, H., Vaillancourt, V., Laroche, C., Giguère, C. et 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*. (Rapport n° R-977). Montréal, QCIRSST.
- NIOSH. (2004). *The worker health chartbook 2004*. Washington, DC: NIOSH.
- 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. et Waugh, R. (1990). The effect of various hearing protectors on sound localization in the horizontal and vertical planes. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 51(7), 370-377. doi:10.1080/15298669091369808
- Noble, W. G. et Russell, G. (1972). Theoretical and practical implications of the effects of hearing protection devices on localization ability. *Acta Oto-laryngologica*, 74(1-6), 29-36. doi:10.3109/00016487209128419
- Popoff-Asotoff, P., Holgate, J. et Macpherson, J. (2012). Which is safer: Tonal or broadband reversing alarms? Communication présentée à *Acoustics 2012 Fremantle:Acoustics, Development and the Environment*, Fremantle, Australie. Tiré de http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2012/papers/p126.pdf
- Robinson, G. S. et Casali, J. G. (2003). Speech communication and signal detection in noise. Dans E. H. Berger, L. H. Royster, J. D. Royster, D. P. Driscoll et M. Layne, *The Noise manual* (5^é éd., p. 567-600). Falls Church, VA: AIHA.
- Russell, G. (1976). Effects of earmuffs and earplugs on azimuthal changes in spectral patterns: Implications for theories of sound localization. *Journal of Auditory Research*, 16(3), 193-207.
- Russell, G. (1977). Limits to behavioral compensation for auditory localization in earmuff listening conditions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61(1), 219-220. doi: 10.1121/1.381261
- SAE. (2009). *Alarm: Backup: Electric laboratory performance testing. society of automotive engineering*. Norme SAE J994.
- Scharine, A. A. (2005). The impact of helmet design on sound detection and localization *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(4). doi: 10.1121/1.4788525.
- Scharine, A. A., Fluitt, K. et Letowski, T. R. (2009). The effects of helmet shape on directional attenuation of sound Communication présentée au 16th International Congress on Sound and Vibration. Cracovie, Pologne.

- Scharine, A. A., MacDonald, B. et Mermagen. (2007). Effect of ear coverage and reflected sound on the localization of sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121, 3094. doi: 10.1121/1.4781973
- Scharine, A. A. et Letowski, T. R. (2013). The measurement of the effects of helmet form on sound source detection and localization using a portable four-loudspeaker test array. (Rapport ARL-TR-64444). Aberdeen, MD.
- Simpson, B. D., Bolia, R. S., McKinley, R. L. et Brungart, D. S. (2005). The impact of hearing protection on sound localization and orienting behavior. *Human Factors*, 47(1), 188-198.
- Suter, A. H. (1989). *The effects of hearing protectors on speech communication and the perception of warning signals*. Aberdeen, MD. Tiré de:
<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a212521.pdf>
- Takimoto, M., Nishino, T., Itou, K. et Takeda, K. (2007). Sound localization under conditions of covered ears on the horizontal plane. *Acoustical Science and Technology*, 28(5), 335-342. doi: 10.1250/ast.28.335
- Tran Quoc, H. et Hétu, R. (1996). La planification de la signalisation acoustique en milieu industriel: critères de conception des avertisseurs sonores de danger. *Canadian Acoustics*, 24, 3-18.
- Vaillancourt, V., Nélisse, H., Laroche, C., Giguère, C., Boutin, J. et Laferrière, P. (2012). *Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds: Évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul*. (Rapport n° R-763) Montréal, QC: IRSST.
- Vaillancourt, V., Nélisse, H., Laroche, C., Giguère, C., Boutin, J. et Laferrière, P. (2013). Comparison of sound propagation and perception of three types of backup alarms with regards to worker safety. *Noise and Health*, 15(67), 420-436. doi: 10.4103/1463-1741.121249
- Vause, N. L. et Grantham, D. W. (1999). Effects of earplugs and protective headgear on auditory localization ability in the horizontal plane. *Human Factors*, 41(2), 282-294. doi: 10.1518/001872099779591213
- Wilkins, P. A. et Martin, A. M. (1978). The effects of hearing protectors on the perception of warning and indicator sounds: A general review. (Rapport technique n° 98). Southampton, Angleterre: University of Southampton.
- Zheng, Y., Giguère, C., Laroche, C., Sabourin, C., Gagné, A. et Elyea, M. (2007). A psychoacoustical model for specifying the level and spectrum of acoustic warning signals in the workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(2), 87-98. doi: 10.1080/15459620701354325
- Zimpfer, V. et Sarafian, D. (2014). Impact of hearing protection devices on sound localization performance. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 135. doi:10.3389/fnins.2014.00135

Annexe A

Consignes pour les seuils de détection et 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

Résultats – Pourcentage de confusion avant/arrière (A/A)

Dans les deux séries d'essais du volet 2, la performance en localisation auditive a également été calculée selon le pourcentage de confusion A/A (# de confusions /36 présentations x 100) pour chacune des 8 conditions expérimentales. Une confusion est comptabilisée lorsque le participant se méprend sur la provenance avant ↔ arrière du son de l'alarme. Ce type de confusion revêt une grande importance pour la sécurité des travailleurs comparativement aux confusions entre deux haut-parleurs adjacents.

B.I Deuxième niveau Sous-titre Style « Titre 2 Annexe »

Des analyses statistiques ont été effectuées séparément pour chaque groupe de participants (bouchons passifs, coquilles passives et double protection), à l'aide d'une ANOVA pour mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : 1) type d'alarme (2 niveaux : alarmes tonales et à large bande), 2) conditions d'écoute (4 niveaux : sans protecteurs auditifs, casque de sécurité seulement, protecteurs auditifs seulement et protecteurs auditifs et casque de sécurité). Les pourcentages de confusion avant/arrière moyens sont présentés à la Figure 19 (bouchons), la Figure 20 (coquilles) et la Figure 21 (double protection). Dans les situations lors desquelles un effet significatif a été obtenu, des comparaisons multiples de type test t (avec un alpha de 0,05) ont permis de déterminer plus précisément les différences entre les niveaux des facteurs.

B.I.I Groupe 1 – bouchons EAR Ultrafit

La figure 19 présente les pourcentages de confusion A/A pour chacune des conditions d'écoute lors du port de bouchons passifs; les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 14,641$, $p = 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 8,678$, $p < 0,001$], mais pas d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 1,726$, $p = 0,170$].

L'alarme à large bande s'est avérée supérieure à l'alarme tonale, avec près de 5 % moins de confusion A/A, ce qui représente environ 2 confusions de moins sur les 36 présentations. Les différences significatives entre conditions d'écoute, telles que déterminées par comparaisons multiples, sont répertoriées au Tableau 11. Il est intéressant de noter que les protecteurs auditifs et le casque de sécurité ont fait augmenter le pourcentage de confusion A/A moyen (de 3-4 %) comparativement à la condition sans protection (oreilles nues), et que l'effet combiné de leur utilisation était plus grand que l'effet individuel de l'un ou l'autre des équipements de protection personnelle utilisé seul (augmentation additionnelle de 3 %). Les différences entre les conditions d'écoute variaient de 3 à 7 %, ce qui représente environ 1 à 3 confusions A/A supplémentaires sur les 36 présentations.

Les pourcentages de confusion gauche/droite ont également été calculés et sont limités à 1 % ou moins, sauf dans le cas de l'alarme tonale lorsque les protecteurs auditifs étaient utilisés seuls (environ 3 %) ou avec le casque de sécurité (environ 4 %). Il semblerait donc que la performance réduite en localisation sonore résulte davantage de confusion entre haut-parleurs adjacents et de confusion A/A, les confusions de type gauche/droite étant moins fréquentes.

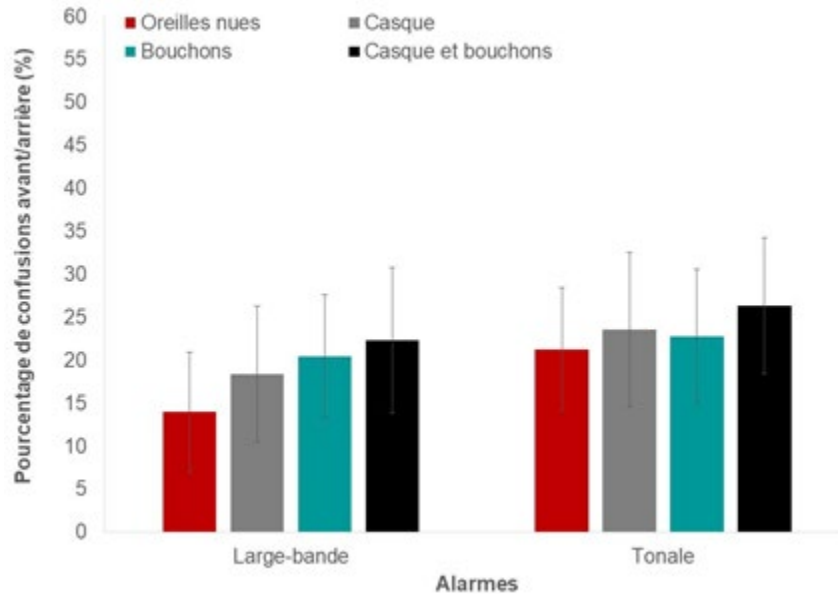


Figure 19. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de bouchons passifs.

Tableau 11. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d'écoute lors du port de bouchons passifs

Ensemble des deux alarmes*
Sans protection > protecteurs seulement (4 % moins de confusion A/A)
Sans protection > casque (3 % moins de confusion A/A)
Sans protection > protecteurs + casque (7 % moins de confusion A/A)
Protecteurs seulement > protecteurs + casque (3 % moins de confusion A/A)
Casque > protecteurs + casque (3 % moins de confusion A/A)

Note :* La taille d'effet est indiquée entre parenthèses.

B.I.II Groupe 2 – coquilles 3M PELTOR Optime 95

La Figure 20 présente les pourcentages de confusion A/A pour chacune des conditions d'écoute lors du port de coquilles passives; les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 41,015$, $p < 0,001$] et pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 7,827$, $p < 0,001$], mais pas d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 0,674$, $p = 0,571$].

L’alarme à large bande s’est avérée supérieure à l’alarme tonale, avec près de 10 % moins de confusion A/A, ce qui représente près de 4 confusions de moins sur les 36 présentations. Les différences significatives entre conditions d’écoute, telles que déterminées par comparaisons multiples, sont répertoriées au Tableau 12. Contrairement aux résultats obtenus avec le groupe d’utilisateurs de bouchons passifs, le casque de sécurité ne semble pas avoir augmenté significativement le nombre de confusions A/A. Encore une fois, les protecteurs auditifs ont fait accroître le pourcentage de confusion A/A moyen lorsqu’utilisés seuls et en combinaison avec le casque de sécurité (d’environ 6-7 %) comparativement à la condition sans protection (oreilles nues). Par contre, l’effet combiné du casque de sécurité et des coquilles n’était pas significativement différent de celui des protecteurs auditifs utilisés seuls. Finalement, l’utilisation combinée des deux équipements de protection personnelle a fait augmenter le pourcentage de confusion A/A comparativement à l’utilisation unique du casque de sécurité, mais des résultats similaires ont été obtenus dans les conditions d’écoute nécessitant seulement les coquilles ou le casque, quoique la différence était proche du seuil de significativité statistique. Les différences entre les conditions d’écoute variaient de 5 à 7 %, ce qui représente environ 2 à 3 confusions A/A supplémentaires sur les 36 présentations.

Les pourcentages de confusion gauche/droite ont également été calculés et sont limités à 2 % ou moins, sauf dans le cas de l’alarme tonale lorsque les protecteurs auditifs étaient utilisés seuls (environ 9 %) ou avec le casque de sécurité (environ 18 %). Il semblerait donc qu’un pourcentage plus élevé de confusion gauche/droite soit obtenu avec les coquilles passives comparativement aux bouchons passifs, du moins pour l’alarme tonale.

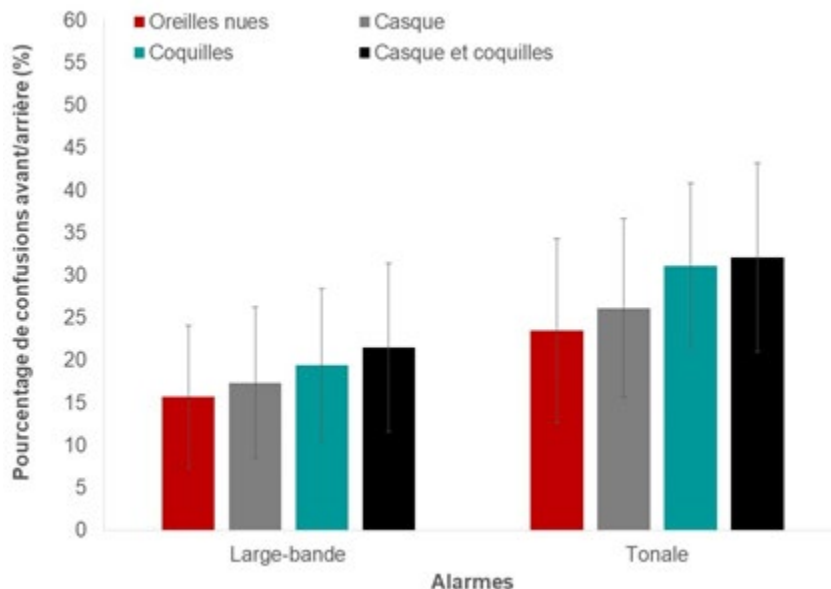


Figure 20. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port de coquilles passives.

Tableau 12. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d'écoute lors du port de coquilles passives

Ensemble des deux alarmes*
Sans protection > protecteurs seulement (6 % moins de confusion A/A)
Sans protection > protecteurs + casque de sécurité (7 % moins de confusion A/A)
Casque de sécurité > protecteurs + casque de sécurité (5 % moins de confusion A/A)

Note : * La taille d'effet est indiquée entre parenthèses

B.I.III Groupe 3 – double protection

Finalement, la Figure 21 présente les pourcentages de confusion A/A pour chacune des conditions d'écoute lors du port de la double protection (bouchons passifs + coquilles passives); les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour la condition d'écoute [$F(2.140,49.222) = 6,436$, $p = 0,003$] ainsi qu'une interaction significative entre les deux facteurs [$F(2.010,46.231) = 7,329$, $p = 0,002$], mais pas d'effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 1,183$, $p = 0,288$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d'écoute. Le pourcentage de confusion A/A s'est avéré plus élevé (de 5 à 8 %) pour l'alarme tonale comparativement à l'alarme à large bande dans deux des quatre conditions d'écoute [sans protection : $t(23) = -2,713$, $p = 0,012$; casque de sécurité seulement : $t(23) = -2,905$, $p = 0,008$]; similaire à celui de l'alarme à large bande dans la condition de double protection auditive seulement [$t(23) = -0,046$, $p = 0,964$] et plus faible (de 8 %) que celui de l'alarme à large bande dans la condition de double protection auditive avec casque de sécurité : $t(23) = 2,534$, $p = 0,019$].

Une ANOVA à mesures répétées sur le facteur condition d'écoute a révélé un effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(2.043,46.987) = 12,507$, $p < 0,001$]. Les différences significatives entre conditions d'écoute, telles que déterminées par comparaisons multiples, sont répertoriées au Tableau 13. Pour l'alarme à large bande, la double protection auditive et le casque de sécurité ont fait augmenter le pourcentage de confusion A/A moyen d'environ 8 % et 3 %, respectivement, comparativement à la condition sans protection. Par ailleurs, l'effet combiné de leur utilisation était plus grand que l'effet individuel de l'un ou l'autre des équipements de protection personnelle utilisé seul (augmentation additionnelle de 6 à 11 %). Les différences entre les conditions d'écoute variaient de 3 à 14 %, ce qui représente environ 1 à 5 confusions A/A supplémentaires sur les 36 présentations. Une ANOVA à mesures répétées sur le facteur condition d'écoute n'a révélé aucun effet significatif pour l'alarme tonale [$F(3,69) = 1,524$, $p = 0,216$].

Les pourcentages de confusion gauche/droite ont également été calculés. Ils sont limités à 2 % ou moins dans les conditions sans protecteurs auditifs (sans protection et casque de sécurité

seulement), mais grimpent drastiquement lorsque la double protection auditive est utilisée seule (38 % pour l’alarme à large bande et 36 % pour l’alarme tonale) et avec le casque de sécurité (42 % pour l’alarme à large bande et 38 % pour l’alarme tonale). Il est intéressant de noter qu’avec la double protection auditive, le pourcentage de confusion gauche/droit excède largement le pourcentage de confusion A/A moyen (d’environ 10 % et 17 % en moyenne sur les deux conditions de double protection – avec et sans casque de sécurité – pour l’alarme à large bande et l’alarme tonale, respectivement).

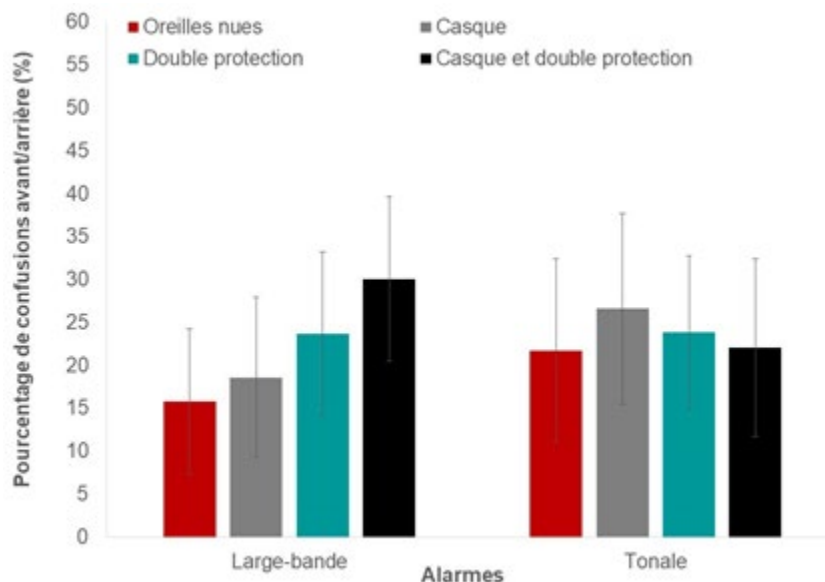


Figure 21. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port d’une double protection (bouchons passifs + coquilles passives).

Tableau 13. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d’écoute lors du port d’une double protection (bouchons passifs + coquilles passives)

Alarme à large bande*
Sans protection > double protection seulement (8 % moins de confusion A/A)
Sans protection > casque (3 % moins de confusion A/A)
Sans protection > double protection + casque (14 % moins de confusion A/A)
Protecteurs seulement > double protection + casque (6 % moins de confusion A/A)

Note : *La taille d’effet est indiquée entre parenthèses.

B.I.IV Différences entre les groupes pour les protecteurs auditifs passifs

Afin d'établir les différences significatives entre les trois groupes de participants (bouchons par rapport à coquilles par rapport à double protection), une ANOVA mixte à mesures répétées a été effectuée pour les résultats issus uniquement de la condition d'écoute avec protecteurs auditifs seulement, pour laquelle les pourcentages de confusion A/A sont présentés à la Figure 22. Les résultats de l'analyse statistique ont révélé un effet principal significatif pour le facteur intrasujets (type d'alarme – 2 niveaux) [$F(1,69) = 12,609$, $p = 0,001$], une interaction significative entre les deux facteurs [$F(2,69) = 7,165$, $p = 0,001$], mais pas d'effet significatif pour le facteur intersujets (type de protecteurs auditifs – 3 niveaux) [$F(2,69) = 1,813$, $p = 0,171$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacun des groupes de participants pour la condition d'écoute avec protecteurs auditifs seulement. Le pourcentage de confusion A/A s'est avéré plus faible pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale pour le groupe d'utilisateurs des coquilles passives [$t(23) = -4,847$, $p < 0,001$], avec une différence d'environ 12 %, mais pas pour les utilisateurs des bouchons passifs [$t(23) = -1,214$, $p = 0,237$] ni pour les utilisateurs de la double protection auditive [$t(23) = -0,046$, $p = 0,964$].

En comparant la performance entre les trois groupes d'utilisateurs de protecteurs auditifs passifs (figure 22), une ANOVA a révélé un effet significatif pour l'alarme tonale [$F(2,69) = 6,308$, $p = 0,003$], le pourcentage de confusion A/A étant plus élevé avec les coquilles comparativement aux bouchons (différence de 9 %) et à la double protection (différence de 7 %), alors qu'aucune différence significative n'a été notée entre les bouchons et la double protection. Une ANOVA n'a révélé aucun effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(2,69) = 1,625$, $p = 0,204$].

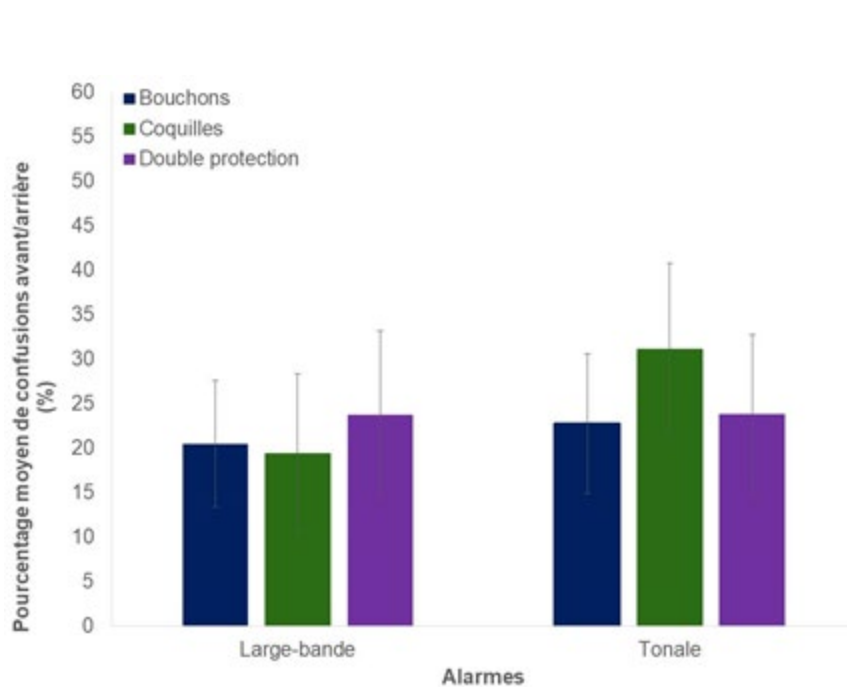


Figure 22. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons passifs, coquilles passives et double protection passive) sans casque de sécurité.

Des analyses similaires ont été effectuées pour le pourcentage de confusion gauche/droite (figure 23). Les résultats d'une ANOVA mixte à mesures répétées ont révélé un effet principal significatif pour le facteur intrasujets (type d'alarme – 2 niveaux) [$F(1,69) = 18,710$, $p < 0,001$] et pour le facteur intersujets (type de protecteurs auditifs – 3 niveaux) [$F(2,69) = 167,056$, $p < 0,001$], mais pas d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(2,69) = 1,178$, $p = 0,177$]. En général, le pourcentage de confusion gauche/droite est plus élevé avec l'alarme tonale comparativement à l'alarme à large bande, d'environ 5 % sur l'ensemble des groupes d'utilisateurs de protecteurs auditifs passifs. En ce qui concerne l'effet significatif du facteur intersujets, les comparaisons multiples ont indiqué un pourcentage de confusion gauche/droite plus élevé dans le cas de la double protection comparativement aux bouchons (d'environ 38 % sur l'ensemble des deux alarmes) et aux coquilles (d'environ 35 % sur l'ensemble des deux alarmes), alors qu'aucune différence significative n'a été notée entre les bouchons et les coquilles.

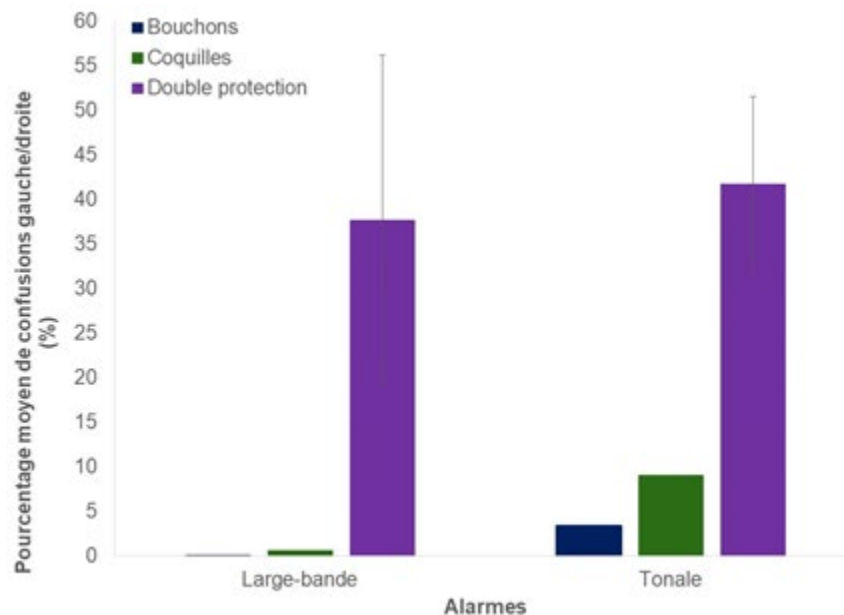


Figure 23. Pourcentages de confusion gauche/droit moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons passifs, coquilles passives et double protection passive) sans casque de sécurité.

B.I.V Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs passifs

En général, le pourcentage de confusion A/A était plus faible pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale, de 5 à 10 % sur l'ensemble des conditions d'écoute pour les bouchons et les coquilles, respectivement. Une telle observation a également été notée dans le groupe d'utilisateurs de la double protection passive, mais uniquement dans les conditions d'écoute sans protecteurs auditifs. Avec la double protection auditive, le pourcentage de confusion A/A pour l'alarme à large bande était similaire (sans casque de sécurité) ou plus élevé (avec casque de sécurité) que celui obtenu avec l'alarme tonale.

Le port de protecteurs auditifs passifs a également contribué à une augmentation du pourcentage de confusion A/A comparativement à la condition sans protection (d'environ 4-7 % pour les bouchons et les coquilles et de 8-14 % pour la double protection avec l'alarme à large bande), sauf dans le cas de la double protection utilisée en présence de l'alarme tonale.

Finalement, le pourcentage de confusion gauche/droite était généralement faible ($\leq 2\%$), mais plus élevé avec l'alarme tonale lors de l'utilisation des bouchons (3-4 %) et des coquilles (9-18 %), et grimpait jusqu'à près de 40 % pour les deux alarmes lors de l'utilisation d'une double protection.

B.II Protecteurs à rétablissement de son

Des analyses statistiques ont été effectuées séparément pour chaque groupe de participants (bouchons 3M PELTOR Tactical Earplug, coquilles 3M PELTOR Protac III et coquilles Howard Leight IMPACT H), à l'aide d'une ANOVA pour mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : 1) type d'alarme (2 niveaux : alarmes tonales et à large bande), 2) conditions d'écoute (4 niveaux : sans protecteurs auditifs, protecteurs auditifs en mode OFF, protecteurs auditifs en position 1, et protecteurs auditifs en position 2). Les pourcentages moyens de confusion A/A sont présentés à la Figure 24 (bouchons 3M tactical earplugs), la Figure 25 (coquilles 3M Protac III) et la Figure 26 (coquilles Howard Leight IMPACT H). Dans les situations lors desquelles un effet significatif a été obtenu, des comparaisons multiples de type test t (avec un alpha de 0,05) ont permis de déterminer plus précisément les différences entre les niveaux des facteurs.

B.II.I Groupe 1 – bouchons 3M PELTOR Tactical

La Figure 24 présente les pourcentages de confusion A/A pour chacune des conditions d'écoute lors du port de bouchons à rétablissement de son 3M PELTOR Tactical; les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 11,797$, $p = 0,002$] et pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 3,176$, $p = 0,029$] mais pas d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 1,036$, $p = 0,382$].

L'alarme à large bande s'est avérée supérieure à l'alarme tonale, avec près de 5 % moins de confusions A/A, ce qui représente environ 2 confusions de moins sur les 36 présentations. Les différences significatives entre conditions d'écoute, telles que déterminées par comparaisons multiples, sont répertoriées au Tableau 14. L'utilisation des bouchons à rétablissement de son en position 2 a généré un pourcentage de confusion A/A sur l'ensemble des deux alarmes 4 % plus élevé (soit environ 1 erreur additionnelle sur 36 présentations) que celui obtenu sans protection, avec les protecteurs en mode OFF et avec les protecteurs en position 1, alors qu'aucune différence statistiquement significative n'a été notée entre ces trois dernières conditions d'écoute.

Les pourcentages de confusion gauche/droite ont également été calculés. Ils sont généralement inférieurs à 1 %, sauf dans le cas de l'alarme tonale lorsque les protecteurs auditifs étaient utilisés en mode OFF (2 %), en position 1 (4 %) et en position 2 (4 %). Il semblerait donc que la performance réduite en localisation sonore résulte davantage de confusion entre haut-parleurs adjacents et de confusion A/A, les confusions de type gauche/droite étant moins fréquentes.

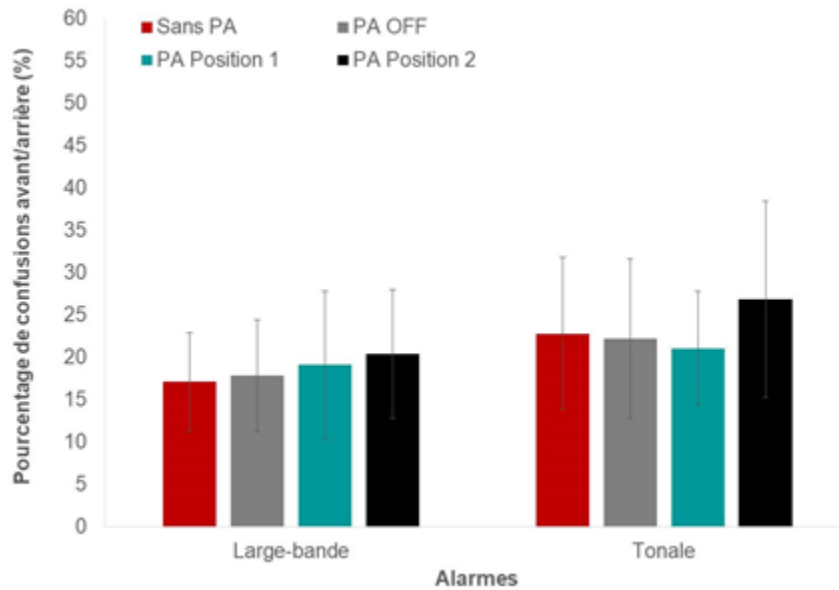


Figure 24. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug.

Tableau 14. Différences statistiquement significatives dans le pourcentage de confusion A/A entre les conditions d’écoute lors du port des bouchons à rétablissement de son 3M Tactical Earplug

Ensemble des deux alarmes*
Sans protection > protecteurs en position 2 (4 % moins de confusion A/A)
Protecteurs OFF > protecteurs en position 2 (4 % moins de confusion A/A)
Protecteurs en position 1 > protecteurs en position 2 (4 % moins de confusion A/A)

Note : *La taille d’effet est indiquée entre parenthèses.

B.II.II Groupe 2 – coquilles 3M PELTOR Protac III

La Figure 25 présente les pourcentages de confusion A/A pour chacune des conditions d'écoute lors du port de coquilles à rétablissement de son 3M PELTOR Protac III; les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 11,023$ $p = 0,003$], mais pas pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 1,970$, $p = 0,127$]. De plus, aucune interaction significative entre les deux facteurs n'a été notée [$F(3,69) = 2,397$, $p = 0,075$].

L'alarme à large bande s'est avérée supérieure à l'alarme tonale, avec environ 4 % moins de confusion A/A, ce qui représente environ 1 confusion de moins sur les 36 présentations.

Encore une fois, les pourcentages de confusion gauche/droite étaient généralement faibles dans toutes les conditions d'écoute pour l'alarme à large bande et sans protecteurs auditifs pour l'alarme tonale, mais augmentaient significativement pour l'alarme tonale lorsque les protecteurs auditifs étaient utilisés en mode OFF (10 %), en position 1 (8 %) et en position 2 (6 %). Ainsi, il semblerait qu'un pourcentage plus élevé de confusion gauche/droite soit obtenu autant avec les coquilles à rétablissement de son 3M PELTOR Protac III qu'avec les bouchons à rétablissement de son 3M PELTOR Tactical, du moins pour l'alarme tonale.

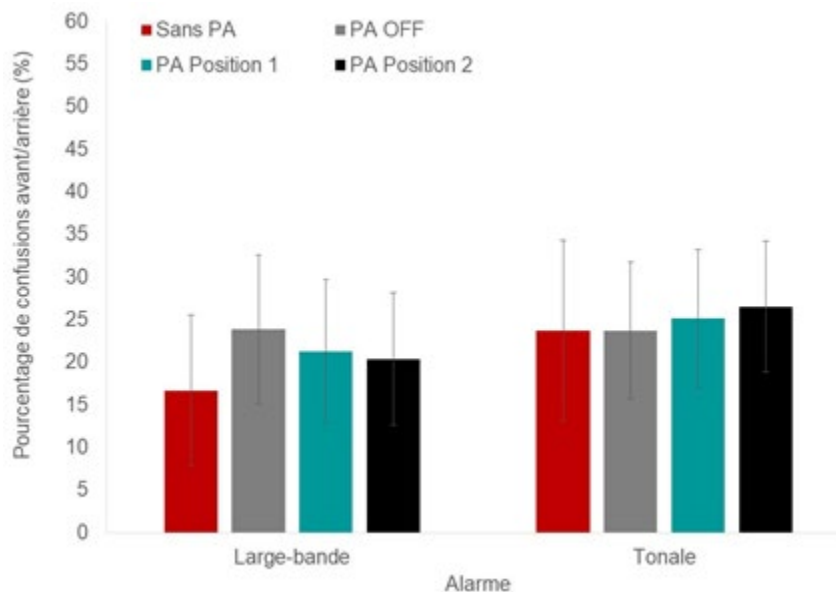


Figure 25. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son 3M Tactical Protac III.

B.II.III Groupe 3 – coquilles Howard Leight IMPACT H

La figure 26 présente les pourcentages de confusion A/A pour chacune des conditions d'écoute lors du port de coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H; les résultats sont exposés séparément pour l'alarme tonale et l'alarme à large bande. Une ANOVA à mesures répétées sur deux facteurs a révélé un effet principal significatif pour le type d'alarme [$F(1,23) = 13,239$, $p = 0,001$] et une interaction significative entre les deux facteurs [$F(3,69) = 2,896$, $p = 0,041$], mais pas d'effet principal significatif pour la condition d'écoute [$F(3,69) = 0,141$, $p = 0,935$].

En raison de la présence d'une interaction significative, des comparaisons ont été effectuées afin d'évaluer la performance des deux alarmes dans chacune des conditions d'écoute. Le pourcentage de confusion A/A s'est avéré plus faible pour l'alarme à large bande comparativement à l'alarme tonale dans seulement deux des conditions d'écoute, soit d'environ 10 % sans protecteurs auditifs [$t(23) = -3,716$, $p = 0,001$] et d'environ 4 % dans la condition d'utilisation des protecteurs en position 2 [$t(23) = -2,342$, $p = 0,028$], la différence entre les deux alarmes étant moins de 2 % dans les deux autres conditions d'écoute [protecteurs en mode OFF : $t(23) = -0,808$, $p = 0,427$; protecteurs en position 1 : $t(23) = -0,782$, $p = 0,442$].

En comparant la performance entre les différentes conditions d'écoute, une ANOVA n'a pas révélé d'effet significatif pour l'alarme à large bande [$F(3,69) = 1,437$, $p = 0,239$] ni pour l'alarme tonale [$F(3,69) = 1,50$, $p = 0,222$].

Tout comme pour les bouchons 3M PELTOR Tactical et les coquilles 3M Protac III, les pourcentages de confusion gauche/droite étaient généralement faibles dans toutes les conditions d'écoute pour l'alarme à large bande et sans protecteurs auditifs pour l'alarme tonale, mais augmentaient significativement pour l'alarme tonale lorsque les protecteurs auditifs étaient utilisés en mode OFF (4 %), en position 1 (5 %) et en position 2 (6 %).

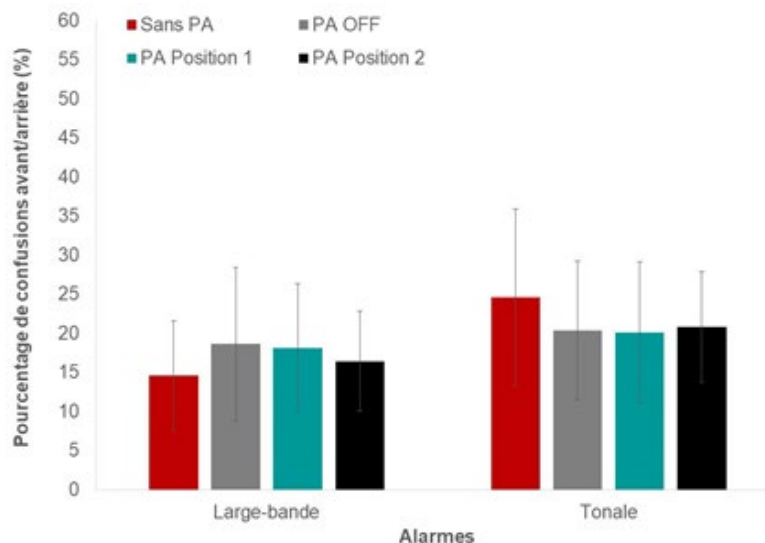


Figure 26. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore lors du port des coquilles à rétablissement de son Howard Leight IMPACT H.

B.II.IV Différences entre les groupes pour les protecteurs auditifs à rétablissement de son

Afin d'établir les différences significatives entre les trois groupes de participants (bouchons 3M PELTOR Tactical, coquilles 3M Protac III et coquilles Howard Leight IMPACT H), et de comparer les résultats à ceux obtenus avec les protecteurs auditifs passifs, une ANOVA mixte à mesures répétées a été effectuée pour les résultats issus uniquement de la condition d'écoute avec protecteurs auditifs en mode OFF, pour laquelle les pourcentages de confusion A/A sont présentés à la figure 27. Les résultats de l'analyse statistique n'ont pas révélé d'effet principal significatif pour le facteur intrasujets (type d'alarme – 2 niveaux) [$F(1,69) = 2,653, p = 0,108$] et pour le facteur intersujets (type de protecteurs auditifs – 3 niveaux) [$F(2,69) = 2.791, p = 0,068$], ni d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(2,69) = 1,128, p = 0,330$]. Ces résultats diffèrent légèrement de ceux obtenus dans la première série d'essais auprès des utilisateurs de protecteurs auditifs passifs, pour laquelle une différence significative avait été notée entre les protecteurs passifs, du moins pour l'alarme tonale, avec un pourcentage de confusion A/A plus élevé pour les coquilles qu'avec les bouchons.

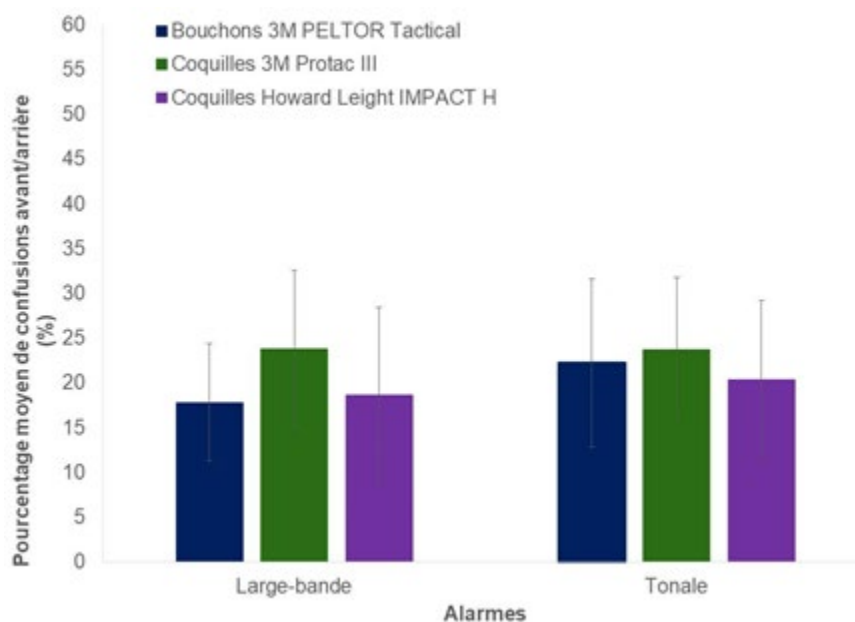


Figure 27. Pourcentages de confusion A/A moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles à rétablissement de son) dans la condition d'écoute avec les protecteurs auditifs en mode OFF.

Le pourcentage de confusion gauche/droite (figure 28) s'est avéré très faible ($\leq 1\%$) dans les trois groupes pour l'alarme à large bande, mais a augmenté de façon significative dans tous les groupes pour l'alarme tonale, atteignant un maximum de 10 % avec les coquilles 3M PELTOR Protac III. Il est intéressant de noter qu'en ce qui concerne les confusions de type gauche/droite, des résultats similaires ont été obtenus avec les bouchons 3M PELTOR Tactical en mode OFF et les bouchons passifs EAR Ultrafit (2 par rapport à 3 % de confusion gauche/droite pour l'alarme tonale) et entre les coquilles 3M PELTOR Protac III en mode OFF et les coquilles passives 3M PELTOR Optime 95 (10 par rapport à 9 % de confusion gauche/droite pour l'alarme tonale). Aucune différence significative n'a été notée entre les bouchons 3M PELTOR Tactical et les coquilles Howard Leight IMPACT H.

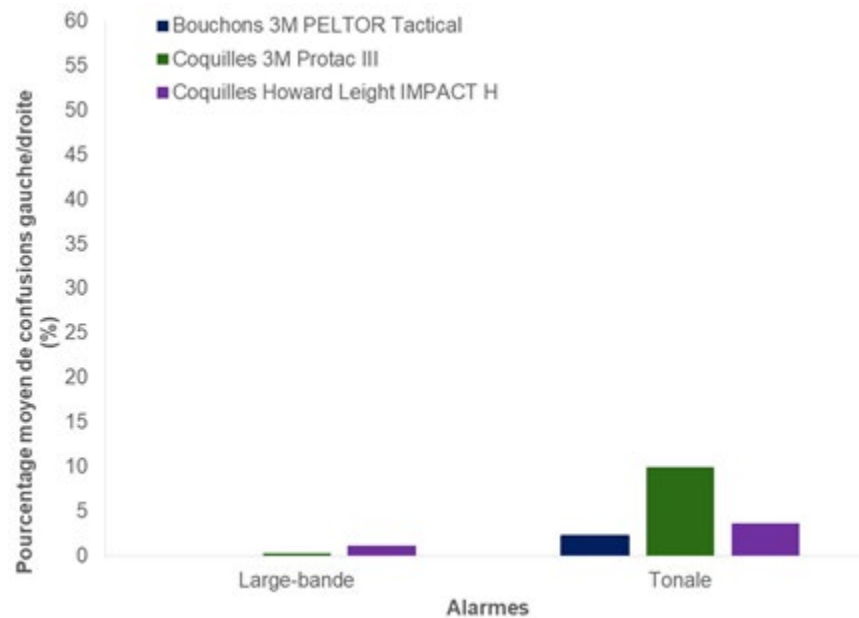


Figure 28. Pourcentages de confusion gauche/droit moyens (± 1 écart-type) en localisation sonore pour chacun des groupes de protecteurs auditifs (bouchons et coquilles à rétablissement de son) dans la condition d'écoute avec les protecteurs auditifs en mode OFF.

En général, le pourcentage de confusion gauche/droite est plus élevé avec l'alarme tonale comparativement à l'alarme à large bande, d'environ 2 à 10 % (moyenne de 5 %) dans tous les groupes d'utilisateurs de protecteurs auditifs à rétablissement de son utilisés en mode OFF.

B.II.V Sommaire du pourcentage de confusion – protecteurs à rétablissement de son

Sans protecteurs auditifs, le pourcentage de confusion A/A moyen sur l'ensemble des groupes était de 16 % pour l'alarme à large bande et de 24 % pour l'alarme tonale, des résultats comparables à ceux obtenus dans la première série d'essais auprès du groupe d'utilisateurs de protecteurs auditifs passifs (15 % pour l'alarme à large bande par rapport à 22 % pour l'alarme tonale). Sauf pour quelques conditions d'écoute (OFF et protecteurs en position 1) avec les coquilles Howard Leight IMPACT H lors desquelles une différence entre les deux alarmes ne

s'est pas avérée statistiquement significative, le pourcentage de confusion A/A était généralement plus faible pour l'alarme à large bande que pour l'alarme tonale, de 4 à 10 % sur l'ensemble des conditions d'écoute et des groupes d'utilisateurs.

L'utilisation de protecteurs auditifs à rétablissement de son ne semble pas avoir augmenté de façon statistiquement significative le pourcentage de confusion A/A, du moins dans le cas des coquilles à rétablissement de son. Pour les bouchons à rétablissement de son, la condition d'écoute avec protecteurs en position 2 a contribué à une augmentation du taux de confusion A/A d'environ 4 % comparativement aux trois autres conditions d'écoute (sans protection, mode OFF et protecteurs en position 1). Il est intéressant de constater que l'utilisation des protecteurs à rétablissement de son en mode OFF n'a pas contribué à une augmentation du pourcentage de confusion A/A, contrairement à l'effet de 6 % qui avait été noté pour les protecteurs auditifs passifs.

Sans protecteurs auditifs, le pourcentage de confusion gauche/droite sur l'ensemble des groupes était nul pour l'alarme à large bande et de 1,4 % pour l'alarme tonale, des résultats comparables à ceux obtenus dans la première série d'essais auprès du groupe d'utilisateurs de protecteurs auditifs passifs l'étude 1 (0 % pour l'alarme à large bande par rapport à 1,4 % pour l'alarme tonale). En effet, le pourcentage de confusion gauche/droite était généralement faible ($\leq 2\%$) dans toutes les conditions d'écoute pour l'alarme à large bande et sans protecteurs auditifs pour l'alarme tonale, mais plus élevé avec l'alarme tonale lors de l'utilisation des bouchons 3M PELTOR Tactical (jusqu'à 4 %), des coquilles 3M PELTOR Protac (6-10 %) et des coquilles Howard Leight IMPACT H (4-6 %).