

É

Bruit et vibrations

Études et recherches

RAPPORT R-763



Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds Évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul

*Véronique Vaillancourt
Hugues Nélisse
Chantal Laroche
Christian Giguère
Jérôme Boutin
Pascal Laferrière*



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.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

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.

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

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

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 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

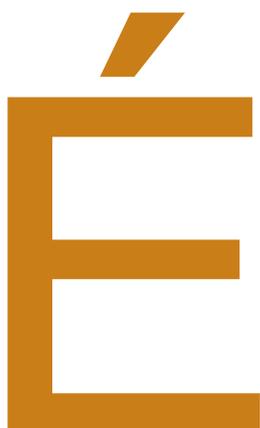
Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2012
ISBN : 978-2-89631-648-9 (PDF)
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
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
décembre 2012



Bruit et vibrations

Études et recherches

RAPPORT R-763

Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds Évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul

Avis de non-responsabilité

L'IRSSST 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'IRSSST 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.

*Véronique Vaillancourt¹, Hugues Nélisse², Chantal Laroche¹,
Christian Giguère¹, Jérôme Boutin², Pascal Laferrière¹*

*1 Programme d'audiologie et d'orthophonie,
Faculté des sciences de la santé, Université d'Ottawa*

*2 Prévention des risques mécaniques et physiques,
IRSSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

Cette étude a été financée par l'IRSSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

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

L'équipe de recherche tient à remercier les membres du comité de suivi pour leur aide, leur appui et leurs judicieux conseils de même que François Ouellet de l'IRSST pour avoir assuré les liens entre les membres du comité et les chercheurs. Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin à la réalisation des essais sur sites. Nous remercions aussi tous les participants aux essais subjectifs en laboratoire à Ottawa. Nous tenons finalement à remercier plus particulièrement messieurs Yves Morissette de la compagnie Graymont et Gervais St-Pierre de l'ASSIFQ-ASSPPQ pour leur aide et assistance dans la logistique des essais sur site.

SOMMAIRE

Une nouvelle technologie d'alarmes de recul de véhicule lourd a fait récemment son apparition sur le marché. Cette technologie, basée sur l'utilisation d'un signal large-bande (bruit de type « pschitt- pschitt ») serait, selon le manufacturier, plus sécuritaire pour les travailleurs tout en causant moins de nuisance environnementale que l'alarme tonale conventionnelle (bruit de type « beep-beep »). Il demeurerait toutefois difficile de se prononcer sur la supériorité de cette technologie puisqu'il existe très peu d'études scientifiques indépendantes et rigoureuses portant sur celle-ci.

Cette étude visait à comparer la nouvelle technologie des alarmes large-bande aux alarmes conventionnelles du point de vue de la sécurité des travailleurs. Deux ensembles d'essais ont été réalisés pour effectuer les comparaisons. Dans une première partie, réalisée sur le terrain, des mesures du champ sonore généré par les alarmes derrière les véhicules ont été réalisées afin d'étudier l'uniformité de ce champ sonore dans des conditions similaires à ce qu'on retrouve en milieu de travail. Dans une seconde partie, effectuée en laboratoire, des épreuves psychoacoustiques ont été réalisées par des participants. Ceux-ci devaient accomplir des tâches liées à la perception des alarmes (seuils de détection, égalisation de la sonie, évaluation du degré d'urgence et localisation auditive).

Une analyse des signaux des alarmes a tout d'abord permis de vérifier que l'alarme large-bande est conforme à la norme SAE J994, qui est la plus utilisée pour la qualification des alarmes installées sur des véhicules lourds. Par la suite, l'ensemble des résultats, tant sur le terrain qu'en laboratoire, n'a pas mis en évidence de contre-indication à utiliser l'alarme de recul large-bande du point de vue de la sécurité des travailleurs. Ce type d'alarme permet notamment 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. Certains avantages que pourrait procurer l'alarme tonale (meilleure détection dans le bruit et degré d'urgence légèrement supérieur dans certaines situations) ne permettent fort probablement pas de contrer l'effet néfaste des fortes variations spatiales du niveau sonore obtenues avec cette alarme derrière le véhicule sur de courtes distances (de l'ordre de 15-20 dB), lesquelles sont nettement plus prononcées que celles générées par l'alarme large-bande.

Dans ce rapport, l'importance de paramètres tels le type de bruit ambiant, le port de protecteurs auditifs ainsi que le type de protecteurs (coquilles vs bouchons) sur les indicateurs psychoacoustiques est présentée pour les différentes alarmes. Finalement, des recommandations sont formulées afin d'assurer une utilisation optimale des alarmes large-bande et certains aspects importants demandant des études plus approfondies sont soulevés.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DE L'ART	3
2.1 Problématique de SST associée au recul de véhicules lourds	3
2.2 La technologie BBS (<i>BroadBand Sound</i>)	6
2.3 Exemples recensés d'utilisation de la technologie BBS	8
2.4 Études comparatives	9
2.4.1 Détection et audibilité	9
2.4.2 Localisation auditive	11
3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	15
4. MÉTHODE	17
4.1 Sélection des alarmes de recul	17
4.1.1 Alarme tonale.....	18
4.1.2 Alarme multi-tonale.....	18
4.1.3 Alarme large-bande (BBS)	18
4.2 Mesures objectives - champ sonore derrière les véhicules	18
4.2.1 Série 1 – Ajustement du niveau des alarmes	18
4.2.2 Série 2 – Homogénéité du champ sonore	19
4.2.3 Sélection des lieux de mesures	20
4.2.4 Sélection des ambiances sonores	20
4.3 Mesures subjectives - épreuves psychoacoustiques	21
4.3.1 Participants.....	21
4.3.2 Dépistage auditif.....	21
4.3.3 Conditions expérimentales en laboratoire.....	22
4.3.4 Seuils de détection	22
4.3.5 Égalisation de la sonie	23
4.3.6 Évaluation du degré d'urgence	23
4.3.7 Localisation auditive.....	23

5.	RÉSULTATS.....	25
5.1	Conformité avec la norme SAE J994	25
5.2	Mesures objectives - champ sonore derrière les véhicules	25
5.2.1	Série 1 – Ajustement du niveau des alarmes	25
5.2.2	Série 2 - Homogénéité du champ sonore	26
5.3	Mesures subjectives - épreuves psychoacoustiques	29
5.3.1	Seuils de détection	29
5.3.2	Égalisation de la sonie	30
5.3.3	Évaluation du degré d'urgence	32
5.3.4	Localisation auditive.....	33
6.	DISCUSSION.....	35
6.1	Conformité avec la norme SAE J994	35
6.2	Mesures objectives- Champ sonore derrière les véhicules.....	35
6.3	Mesures subjectives- Épreuves psychoacoustiques.....	36
6.3.1	Détection.....	36
6.3.2	Sonie et urgence.....	37
6.3.3	Localisation.....	38
7.	CONCLUSION.....	41
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	43
ANNEXE A	ACCIDENTS MORTELS AUX ÉTATS-UNIS ENTRE 1992-2007.....	51
ANNEXE B	EXEMPLES D'UTILISATION D'ALARMES DE TYPE BBS.....	53
ANNEXE C	SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES ALARMES.....	55
ANNEXE D	DÉFINITION DES POSITIONS DES MICROPHONES POUR LES MESURES TERRAINS	61
ANNEXE E	MILIEUX DE TRAVAIL, VÉHICULES ET AMBIANCES SONORES SÉLECTIONNÉS	63
ANNEXE F	DESCRIPTION DU LABORATOIRE ET DES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS	65
ANNEXE G	RÉSULTATS – CHAMP SONORE DERRIÈRE LE VÉHICULE	67
ANNEXE H	RÉSULTATS – ÉPREUVES PSYCHOACOUSTIQUES.....	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Moyennes et écarts-type du rapport signal/bruit (en dB) et niveaux au microphone de référence (en dB(A)).....	26
Tableau 2 : Synthèse des cas d'accidents mortels survenus aux États-Unis entre 1992-2007 (source: banque de données électronique du NIOSH).....	51
Tableau 3 : Exemples d'utilisation de la technologie des alarmes à large bande de fréquences. Toutes les sources énumérées étaient accessibles en ligne en date du 25 septembre 2011.....	53
Tableau 4 : Position des microphones telle que définie dans ISO 9533.....	61
Tableau 5: Sommaire des véhicules utilisés et lieux visités.....	63
Tableau 6 : Différences significatives obtenues lors de la comparaison du degré moyen d'urgence évoqué par les différentes alarmes de recul.....	81
Tableau 7 : Augmentation du degré d'urgence en fonction du niveau de présentation avec les coquilles.....	87
Tableau 8 : Augmentation du degré d'urgence en fonction du niveau de présentation avec les bouchons.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Exemple de niveau de pression sonore mesuré à l'arrière d'un véhicule en fonction de la distance lorsqu'une alarme de recul de type son pur est en opération.....	5
Figure 2 : Représentation du contenu spectral des alarmes	17
Figure 3 : Exemples d'installation des alarmes sur un véhicule : a) alarme Grote en condition « réaliste »; b) alarme Grote en condition « idéale »; c) alarme BBS en condition « idéale ».....	19
Figure 4 : Spectre des quatre bruits retenus. Niveaux sonores globaux : Bruit 1 – 80,5 dBA; Bruit 2 – 83,3 dBA; Bruit 3 – 85,9 dBA; Bruit 4 – 89,6 dBA.....	21
Figure 5 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) derrière le véhicule au Site 1 : (a) alarme en position « réaliste »; (b) alarme en position « idéale ».....	28
Figure 6 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) selon l'axe 5 de la Figure 14 (site 1, alarme en position dite « idéale »).....	29
Figure 7 : Seuils de détection moyens des alarmes de recul dans 4 environnements bruyants, avec et sans protection auditive.....	30
Figure 8 : Égalisation de la sonie par rapport à l'alarme tonale dans 4 environnements bruyants, avec et sans protection auditive.....	31
Figure 9 : Degré d'urgence (échelle 0-100) dans 4 environnements bruyants avec 3 rapports signal-bruit différents, avec et sans protection auditive.....	32
Figure 10 : Erreur angulaire moyenne (haut) et pourcentage de confusion (bas), avec et sans protection auditive.....	34
Figure 11 : Trace temporelle des trois alarmes sur une période de 3 secondes.....	57
Figure 12 : Patrons de directivité des alarmes utilisées; (a) photo du montage de mesure; (b) écart du niveau de bruit par rapport à la valeur à $\theta=0^\circ$	59
Figure 13 : Illustration du positionnement des microphones telle que définie dans ISO 9533	61
Figure 14 : Définition des lignes de balayage pour la mesure du champ sonore derrière le véhicule.....	62
Figure 15 : Environnements utilisés pour l'échantillonnage des ambiances sonores.....	64
Figure 16 : Schéma de la salle utilisée pour les tâches de détection, d'égalisation de la sonie et d'évaluation du degré d'urgence.....	66
Figure 17 : Position des haut-parleurs pour les tests de localisation auditive	66
Figure 18 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) derrière le véhicule au Site 2 : (a) alarme en position « réaliste »; (b) alarme en position « idéale ».....	68
Figure 19 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) derrière le véhicule au Site 3 : (a) alarme en position « réaliste »; (b) alarme en position « idéale ».....	69
Figure 20 : Comparaison du seuil de détection moyen des alarmes en ajustant les niveaux des facteurs bruit et port de protecteurs (sans/avec protecteurs).....	71

Figure 21 : Comparaison du seuil de détection moyen obtenu dans chacun des bruits en ajustant les niveaux des facteurs alarme et port de protecteurs (sans/avec protecteurs).....	72
Figure 22 : Comparaison du seuil de détection moyen obtenu sans et avec protecteurs auditifs en ajustant les niveaux des facteurs alarme et bruit.....	73
Figure 23 : Comparaison de l'égalisation de la sonie des alarmes multi-tonale et large-bande par rapport à l'alarme tonale – Évaluation du facteur alarme. L'axe des y représente la différence de niveau sonore entre l'alarme sous observation (soit l'alarme multi-tonale ou l'alarme large-bande) et l'alarme de référence (l'alarme tonale).....	75
Figure 24 : Comparaison de l'égalisation de la sonie des alarmes multi-tonale et large-bande par rapport à l'alarme tonale – Évaluation du facteur bruit. L'axe des y représente la différence de niveau sonore entre l'alarme sous observation (soit l'alarme multi-tonale ou l'alarme large-bande) et l'alarme de référence (l'alarme tonale).....	76
Figure 25 : Comparaison de l'égalisation de la sonie des alarmes multi-tonale et large-bande par rapport à l'alarme tonale – Évaluation du facteur port de protecteurs auditifs. L'axe des y représente la différence de niveau sonore entre l'alarme sous observation (soit l'alarme multi-tonale ou l'alarme large-bande) et l'alarme de référence (l'alarme tonale).....	77
Figure 26 : Comparaison du niveau moyen d'urgence évoqué par les trois différentes alarmes de recul chez les participants du groupe des coquilles, en ajustant les niveaux du facteur port de protecteurs.	80
Figure 27 : Comparaison du niveau moyen d'urgence évoqué par les trois différentes alarmes de recul chez les participants du groupe des bouchons, en ajustant les niveaux du facteur port de protecteurs.	82
Figure 28 : Comparaison du niveau moyen d'urgence évoqué dans les quatre bruits en fonction du type d'alarme pour le groupe des coquilles..	82
Figure 29 : Comparaison du niveau moyen d'urgence évoqué par les alarmes dans les quatre bruits pour le groupe des bouchons.	83
Figure 30 : Comparaison du degré moyen d'urgence sans et avec coquilles en ajustant pour les niveaux des facteurs alarme et niveau de présentation.	84
Figure 31 : Comparaison du degré moyen d'urgence sans et avec bouchons en ajustant pour les niveaux des facteurs alarme et niveau de présentation.	85
Figure 32 : Comparaison du degré moyen d'urgence perçu pour trois niveaux de présentation en ajustant pour le facteur port de protecteurs auditifs pour le groupe des coquilles.	86
Figure 33 : Comparaison du degré moyen d'urgence perçu pour trois niveaux de présentation en ajustant pour le facteur port de protecteurs auditifs pour le groupe des bouchons.	87
Figure 34 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l'erreur angulaire moyenne (figure de droite) des alarmes pour le groupe des coquilles en ajustant les niveaux des facteurs arrangement des haut-parleurs et port de protecteurs.	90

Figure 35 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l'erreur angulaire moyenne (figure de droite) dans les divers arrangements des haut-parleurs en ajustant les niveaux des facteurs alarme et port de protecteurs.....	91
Figure 36 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure du haut) et de l'erreur angulaire moyenne (figure du bas) pour chaque condition du port de protecteurs auditifs en ajustant les niveaux des facteurs alarme et arrangement des haut-parleurs.....	93
Figure 37 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l'erreur angulaire moyenne (figure de droite) des alarmes en ajustant les niveaux du facteur arrangement des haut-parleurs.....	94
Figure 38 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l'erreur angulaire moyenne (figure de droite) pour les divers arrangements des haut-parleurs en ajustant les niveaux du facteur alarme.	95

1. INTRODUCTION

Étant donné le nombre important d'accidents impliquant chaque année des véhicules en marche arrière, il devient primordial d'assurer la conception optimale des alarmes de recul afin d'alerter promptement les travailleurs à proximité des véhicules, tout en limitant la nuisance due au bruit pour les individus éloignés qui ne sont pas à risque. Les avertisseurs sonores présentent un avantage sur les avertisseurs visuels puisqu'ils captent habituellement l'attention des individus, peu importe où est fixé leur regard. Des accidents peuvent quand même survenir en milieu de travail lorsque les alarmes ne sont pas bien perçues à l'oreille, à cause du bruit interférant ou du port d'un protecteur auditif par exemple, lorsque le signal sonore qu'elles émettent est difficile à localiser dans l'espace et n'engendre pas un réflexe de mouvement dans la bonne direction par le travailleur ou lorsqu'il est ignoré, comme dans les cas où le signal est fréquemment déclenché sans état réel de danger ou d'urgence. Dans d'autres circonstances, les alarmes de recul sont tellement fortes et dérangeantes que les individus préfèrent les désactiver plutôt que de les laisser en fonction.

Les alarmes de recul utilisées depuis longtemps au Québec et ailleurs sont généralement composées d'un son tonal à fréquence fixe (le plus courant) ou à fréquence hululée. Or, plusieurs inquiétudes ont été formulées quant à l'utilisation de ce type d'alarmes tonales par différents groupes de chercheurs et d'intervenants en milieu de travail, tant en ce qui a trait de la sécurité des travailleurs que de la nuisance environnementale. Une technologie relativement récente d'alarmes de recul composées d'un bruit à large bande de fréquences vise à surmonter les principaux problèmes liés aux alarmes tonales conventionnelles. Cette technologie a été commercialisée et une gamme d'alarmes de recul à large bande de fréquences est maintenant disponible. L'avènement de cette nouvelle technologie suscite une question importante pour les milieux de travail : est-ce que l'utilisation de ces alarmes, plutôt que les alarmes conventionnelles, améliorera significativement la détection et la localisation de véhicules en marche arrière ainsi que la sensation d'urgence pour assurer la sécurité, tout en limitant la nuisance environnementale? Déjà certains milieux de travail québécois ont démontré un intérêt face à cette technologie et désirent l'implanter. Il demeure toutefois difficile de se prononcer maintenant sur la supériorité de cette technologie puisqu'il existe à ce sujet très peu d'études scientifiques indépendantes et rigoureuses démontrant que la sécurité des travailleurs est mieux assurée.

C'est dans ce contexte que ce rapport présente les résultats d'un projet, constitué de deux parties, qui visait à comparer la nouvelle technologie des alarmes large-bande aux alarmes conventionnelles. La première partie, réalisée sur le terrain, ciblait des mesures du champ sonore généré par les alarmes derrière les véhicules. La seconde partie, effectuée en laboratoire, faisait état des mesures réalisées sur des participants. Ceux-ci devaient accomplir des tâches psychoacoustiques liées à la perception des alarmes (seuils de détection, égalisation de la sonie, évaluation du degré d'urgence et localisation auditive). Ce projet visait uniquement la dimension santé et sécurité du travailleur liée à la problématique des alarmes de recul et non la nuisance environnementale. Les sections qui suivent présentent une revue de la littérature, les objectifs du projet, la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus. Une discussion et une conclusion viennent clore le rapport.

2. ÉTAT DE L'ART

2.1 Problématique de SST associée au recul de véhicules lourds

Selon la section 1926.601 (b)(4) de la réglementation sur les véhicules motorisés de l'Occupational Safety and Health Administration aux États-Unis (OSHA, 2000), les conducteurs de camions lourds qui ont une vue arrière obstruée doivent opérer avec une alarme de recul fonctionnelle qui se fait entendre au-dessus du bruit ambiant ou doivent seulement reculer leur véhicule avec l'aide d'un signaleur. Au Québec, deux articles du Code de sécurité pour les travaux de construction (à jour au 1^{er} octobre 2011) portent sur les signaux avertisseurs. L'article 3.10.5 indique qu'un signaleur est requis lorsqu'un véhicule fait marche arrière « si ce déplacement peut mettre en cause la sécurité d'une personne » ou que la vue est obstruée. Au paragraphe 2 de l'article 3.10.12, on identifie une liste de véhicules qui doivent être munis d'un klaxon automatique pour la marche arrière qui a « une intensité supérieure au bruit de l'équipement sur lequel il est installé avec un son distinct ». Par ailleurs, « si le klaxon automatique est électrique, il doit en plus être conforme à la norme *Performance, Test and Application Criteria for Electrically Operated Backup Alarm Devices* SAE J994b-1974 ».

Malgré de telles directives, on déplore chaque année un nombre accru d'accidents et de mortalités impliquant des véhicules lourds en marche arrière (Laroche et al., 1995; Murray et coll., 1998; NIOSH, 2004; Blouin, 2005), au Québec et ailleurs. Un récent accident, survenu le 2 septembre 2011 sur un chantier de construction de l'autoroute 30 lors duquel un arpenteur a été écrasé par un camion en marche arrière, soulève des manquements importants en matière de sécurité au travail. Malgré des directives clairement formulées par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) à la suite de l'accident, une enquête a révélé que plusieurs manœuvres de recul étaient toujours effectuées sans signaleur et que certains véhicules n'étaient pas encore munis d'une alarme de recul (CSST, 2011).

Près d'un quart de tous les décès impliquant des véhicules au travail ont lieu lorsque le véhicule est en marche arrière (HSE, 2001). Aussi, à partir des rapports d'accident publiés par l'OSHA de 1972 à 2001, Purswell et Purswell (2001) estiment qu'environ 43 % des 150 accidents répertoriés qui impliquaient des véhicules en marche arrière ont eu lieu malgré le bon fonctionnement de l'alarme de recul. Du côté québécois, Laroche et collaborateurs (Laroche et coll., 1991, 1995; Laroche et Denis, 2000) ont identifié, à l'aide de la banque de données informatisées de la CSST (www.centredoc.csst.qc.ca), 25 accidents mortels causés par des véhicules en marche arrière qui sont survenus au Québec entre 1975 et 1991, dont 15 sur des chantiers de construction. Le secteur de la construction semble donc particulièrement concerné par cette problématique. Selon le US Bureau of Labor Statistics, 6 % de tous les accidents mortels (397 décès) dans le secteur de la construction en 2002 seraient dus à un écrasement par un véhicule en marche arrière (Seattle District Safety Gram, 2009). Finalement, un tableau-synthèse de 19 écrasements mortels de ce type survenus sur des chantiers de construction aux États-Unis entre 1992 et 2007 est présenté à l'Annexe A. Dans la plupart des cas, l'alarme était fonctionnelle et en marche lors de l'accident et le véhicule se déplaçait à des vitesses inférieures à 5 mph.

Des accidents peuvent survenir dans les environnements de travail bruyants lorsque des avertisseurs sonores n'attirent pas l'attention, soit parce qu'ils ne sont pas entendus ou qu'ils sont

ignorés, par exemple dans les cas où le signal est fréquemment déclenché, mais ne provoque aucun sentiment de danger ou d'urgence à cause du phénomène d'habituation. Dans d'autres circonstances, les alarmes de recul sont tellement fortes et agressives qu'elles sont désactivées. D'autres facteurs pouvant contribuer à la non-perception de l'alarme de recul sont la perte auditive, le masquage par le bruit ambiant et l'installation inappropriée de l'alarme sur le véhicule lourd (Laroche et Lefebvre, 1998), ainsi que le port de protecteurs auditifs.

Ces états de fait soulèvent des préoccupations importantes quant à l'efficacité des alarmes de recul conventionnelles à transmettre un sentiment d'urgence dans la zone critique derrière les véhicules lourds. Plusieurs facteurs contribuent à cette efficacité, incluant: le contenu fréquentiel de l'alarme, le statut auditif des travailleurs, le masquage par le bruit ambiant, le phénomène d'habituation, la reconnaissance du signal, le temps de réaction, le degré d'urgence véhiculé par le signal, la capacité de localiser le signal et le patron de propagation sonore du signal (Morgan et Peppin, 2008). L'alarme doit en effet véhiculer de l'information pour répondre à trois questions importantes (Catchpole et coll., 2004), soit: 1) quel est le danger? 2) où est le danger? et 3) quand s'agit-il d'un danger? (*what? where? when?*).

Dans la littérature, on dénote par ailleurs aux moins trois problèmes majeurs associés aux alarmes de recul conventionnelles, soit une difficulté de localisation auditive, la non-uniformité du patron de propagation sonore derrière le véhicule et la nuisance environnementale.

- Localisation auditive

Le « beep, beep, beep » d'un véhicule en marche arrière est familier à tous, mais les individus sont souvent incertains de sa provenance. Les sirènes des véhicules d'urgence sont un autre exemple convaincant d'un signal difficile à localiser et pour lequel il arrive fréquemment d'être confondus en ne sachant pas si le véhicule s'approche de devant, de derrière, de la droite ou de la gauche. Malgré l'étendue de la gamme fréquentielle accessible aux humains (20 à 20 000 Hz), les indices importants pour la localisation se retrouvent principalement aux fréquences inférieures à 1500 Hz et supérieures à 3000 Hz. Pour les sons inférieurs à 1500 Hz, l'indice principal pour distinguer les sons dans la dimension gauche-droite est la différence interaurale dans le temps d'arrivée (DIT) alors que pour les sons supérieurs à 3000 Hz c'est la différence interaurale d'intensité (DII) qui importe. Une dernière catégorie d'indices spectraux en hautes fréquences (> 5000 Hz) permet de distinguer les sources provenant de l'avant de celles qui proviennent de l'arrière et de juger le degré d'élévation de la source (Middlebrooks et Green, 1991; Carlile et King, 1993; Blauert, 1997; Hartmann, 1999).

Les alarmes à large spectre sont en théorie plus faciles à localiser en offrant un nombre maximal d'indices à traiter (DIT, DII, indices spectraux), comparativement aux signaux tonaux ou à étendue spectrale limitée tels que les sirènes de véhicules d'urgence et les alarmes de recul conventionnelles typiquement composées d'une fréquence dominante entre 1000 et 4000 Hz (Laroche et Lefebvre, 1998), région fréquentielle où peu d'indices sont disponibles pour la localisation¹. Par ailleurs, la norme SAE J994 (2009) préconise une fréquence prédominante entre 700 Hz et 2800 Hz pour les alarmes de recul. Les confusions engendrées dans l'identification de la position de la source sonore peuvent entraîner une réponse tardive de la part

¹ Le contenu spectral de l'alarme tonale et large-bande est présenté à la Figure 2.

du travailleur, alors que le temps de réaction est souvent un élément critique face à un danger. Finalement, dans une perspective de santé et sécurité au travail, l'effet des protecteurs auditifs doit également être pris en considération puisque ceux-ci peuvent compromettre davantage les capacités de localisation auditive (p. ex. Tran Quoc et Hétu, 1996; Bolia et coll. 2001; Berger, 2003; Simpson et coll. 2005).

- Propagation sonore

Les difficultés de détection et les confusions quant à la position de la source peuvent également être attribuées aux variations spatiales abruptes du niveau de pression sonore de l'alarme sur de très courtes distances derrière les véhicules lourds. Cette problématique est bien documentée avec les alarmes de recul tonales (Laroche et coll., 1995; Laroche et Lefebvre 1997, 1998; Laroche, 2006). Ce patron non uniforme de propagation dû aux interférences des ondes sonores (réflexions et diffractions) fait en sorte que les travailleurs peuvent sous-estimer ou surestimer la distance et la direction d'un véhicule qui est hors de leur champ de vision. Il a aussi été identifié comme un facteur ayant probablement contribué à un accident mortel sur un chantier de construction routière à proximité de Montréal en 2003 (Laroche, 2006). La Figure 1, issue des travaux de Laroche et coll. (1995), illustre le niveau de pression sonore d'une alarme derrière un véhicule immobile en fonction de la distance. On observe qu'à des distances de moins de 2 m du véhicule, le niveau fluctue énormément, pouvant atteindre des variations jusqu'à 15 dB sur l'espace de quelques cm, et ne suit pas une décroissance régulière en fonction de la distance.

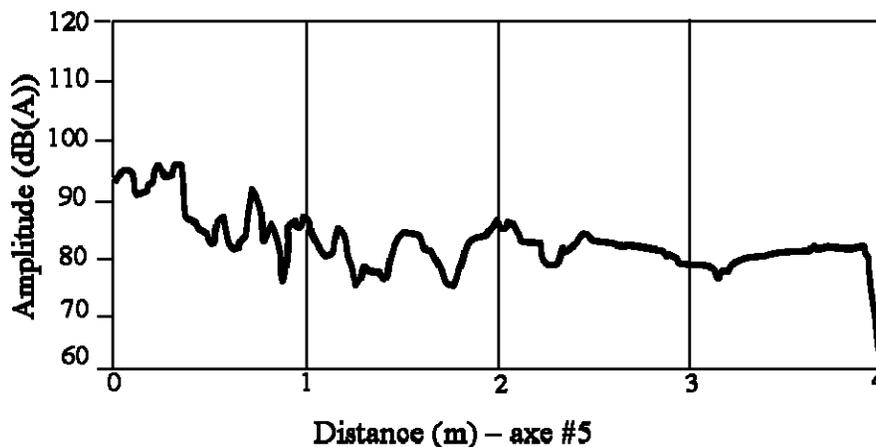


Figure 1 : Exemple de niveau de pression sonore mesuré à l'arrière d'un véhicule en fonction de la distance lorsqu'une alarme de recul de type son pur est en opération.

En plus du manque d'uniformité dans le patron de propagation, le son des alarmes tonales se propage sur des distances importantes, bien au-delà de la zone immédiate du danger derrière le véhicule. Une fausse alarme survient lorsque l'alarme est entendue en dehors de la zone de danger. Le phénomène qui en découle contribue à diminuer le taux d'association entre l'alarme et le danger, et du même coup son efficacité (Morgan et Peppin, 2008; Bliss et coll. 1995; Bliss et Dunn, 2000; Holzman, 2011). En effet, une étude par Bliss et coll. (1995) démontre que le taux de réponse à l'alarme, chez des gens investis dans une tâche cognitive, correspond de près au taux de fidélité de l'alarme. Si le signal sonore est associé à un taux élevé de fausses alarmes,

soit 75 % par exemple (l'alarme attire l'attention sur une vraie situation de danger seulement 25 % du temps), la majorité des gens ne répondrait alors au signal que 25 % du temps. La sécurité en milieu de travail peut alors être nettement compromise par des signaux parfaitement audibles qui perdent leur efficacité à véhiculer un message de danger en raison de la multiplication des fausses alarmes.

- Nuisance environnementale

Le bruit des alarmes de recul tonales émit dans le voisinage peut être entendu sur de longues distances par des résidents qui n'ont pas à y répondre. Il s'agit donc d'une pollution sonore dérangeante et inutile pour eux (Burgess et McCarty, 2009) et ceci mène à de nombreuses frustrations et plaintes, voire à des actions judiciaires. Dans les faits, c'est souvent les récriminations et les éventuels recours juridiques qui motivent les entreprises à changer leurs alarmes de recul, bien plus que la sécurité de leurs travailleurs.

Le caractère imprévisible des alarmes de recul et le manque de contrôle ressenti sur cette source de bruit contribuent beaucoup à l'impact sur l'entourage immédiat. Les alarmes tonales ont par ailleurs été citées comme une des six plus importantes sources de bruit pouvant générer des conséquences comportementales et émotionnelles dans un rapport récent publié par la National Academy of Engineering (Committee on Technology for a Quieter America, 2010). Elles ont aussi été identifiées comme un problème important de bruit de construction nocturne dans plusieurs états américains (Federal Highway Administration, 2008). Et tel que mentionné précédemment, la nuisance générée par les alarmes ne touche pas uniquement les résidents à proximité, mais aussi les travailleurs (Burgess et McCarty, 2009) qui vont souvent désactiver ou endommager les alarmes jugées trop fortes et agressives (Haas et Edworthy, 1998).

Une bonne alarme de recul doit véhiculer un degré d'urgence approprié reflétant bien la situation de danger. Quoique plusieurs paramètres puissent influencer le degré d'urgence perçu (Hellier et Edworthy, 1989; Edworthy et coll., 1991; Edworthy et Stanton, 1995; Haas et Casali, 1995; Haas et Edworthy, 1998), les principaux sont la fréquence dominante, le rythme et l'étendue fréquentielle. La norme SAE J994 spécifie par ailleurs la fréquence dominante, le taux de répétition et la durée de l'intervalle « on/off » (SAE J994, 2009) à utiliser pour les alarmes de recul. En général, les hautes fréquences, un spectre fréquentiel large et un taux rapide de répétition sont jugés urgents (Edworthy et coll., 1991).

2.2 La technologie BBS (*BroadBand Sound*)

La technologie des alarmes à large bande de fréquences, communément appelée BBS et développée à Leeds University (Withington, 2004) au Royaume-Uni et commercialisée mondialement, vise à réduire la nuisance environnementale tout en augmentant l'efficacité des alarmes de recul par une meilleure propagation sonore derrière les véhicules et une bonne localisation auditive. Quoique plusieurs documents, dont un « white paper » et plusieurs brochures publicitaires du manufacturier Brigade Electronics, vantent les mérites de cette technologie (Leventhall 2007; Morgan, 2007; Morgan et Peppin, 2008; Brigade Electronics, 2011) en rapportant des avantages relatifs à la sécurité, à la nuisance environnementale et à la santé, les propos rapportés ne s'appuient pas toujours sur des données vérifiées expérimentalement et font souvent référence à des anecdotes et des exemples de cas.

- Bénéfices anticipés pour la sécurité

En raison de son large spectre fréquentiel, ce signal avertisseur serait plus facile à localiser dans l'espace (disponibilité d'un nombre plus important d'indices pour la localisation), générerait un patron de propagation plus uniforme derrière les véhicules (moins d'interférences des ondes sonores), serait plus facile à détecter (plus de composantes fréquentielles dans la région la plus sensible de l'oreille, soit entre 2000 et 4000 Hz) et serait moins susceptible d'être masqué par le bruit du milieu de travail. Une meilleure audibilité pour les gens avec perte auditive et ceux qui portent des protecteurs auditifs (les basses fréquences pouvant plus facilement pénétrer les obstacles physiques que les hautes fréquences) est également rapportée. D'autres bénéfices pour la sécurité incluraient, selon ces divers documents, un taux plus élevé de réponses (moins de fausses alarmes) ainsi qu'une réduction des phénomènes de désactivation et de sabotage intentionnels des dispositifs d'alarme.

Quoique les deux types d'alarme respectent les caractéristiques temporelles nécessaires pour représenter un danger, tel que stipulé dans la norme SAE J994 (SAE, 2009), le BBS assurerait, selon les auteurs ci-haut mentionnés, une meilleure reconnaissance que l'alarme tonale conventionnelle en offrant un message clair et non ambigu. Selon eux, le signal BBS est entendu seulement dans la zone de danger et sa provenance est plus facile à identifier, limitant ainsi la confusion entre diverses sources. Pour appuyer ce constat, on rapporte une anecdote reliée à un accident au cours duquel le travailleur heurté avait entendu l'alarme tonale, mais avait tenu pour acquis que le signal de danger provenait d'un autre camion qu'il voyait reculer. Sa propagation étant plus limitée à l'aire de danger, le BBS ne véhiculerait pas autant de faux messages de danger que les sons purs, selon les manufacturiers.

- Bénéfices anticipés quant à la nuisance environnementale

Selon le manufacturier (Brigade Electronics, 2009), une réduction de l'impact environnemental proviendrait du fait qu'à même niveau sonore global en dBA, les sons riches en composantes fréquentielles semblent plus forts que les sons à spectre limité. Le niveau du BBS pourrait ainsi être réglé 5 dBA plus bas que celui de l'alarme tonale pour générer la même sonie, réduisant du même coup l'énergie sonore émise dans le voisinage. La propagation plus variable des sons purs entre également en jeu puisque les pics de niveau seraient entendus sur une plus grande distance du camion, toujours selon le manufacturier.

L'aspect directionnel de l'alarme large-bande est également cité parmi les avantages de cette technologie. Sa propagation se limiterait davantage à la zone de danger, les hautes fréquences contenues dans le signal étant plus directionnelles et plus facilement absorbées dans l'air et par le sol. Le niveau sonore produit par l'alarme subirait ainsi une atténuation plus rapide en fonction de la distance qu'un son pur, menant ainsi à des niveaux sonores pouvant être masqués par le bruit ambiant et limitant du même coup l'intrusion du signal dans l'environnement.

De plus, à même niveau sonore, on rapporte que l'alarme tonale est plus stridente et donc plus gênante (agressante) que l'alarme large-bande (Brigade Electronics, 2011). Dans le même sens, certains organismes préconisent l'imposition de pénalité allant de 3 à 7 dBA dans le calcul de la nuisance environnementale dans le cas de bruits à fortes composantes tonales (ISO 1996-1, 2003; Federal Aviation Administration, 2012)

Si le BBS peut être réglé à des niveaux plus faibles (en raison de sa sonie plus importante) et que le signal se propage moins à l'extérieur de la zone de danger (plus directionnel), il serait logique de noter une réduction des plaintes de bruit communautaire et du phénomène d'habituation par les travailleurs. Des exemples de cas rapportant une réduction des plaintes à la suite de l'installation d'alarmes large-bande sont par ailleurs nombreux dans l'internet et les documents publicitaires de la compagnie Brigade Electronics. Enfin, de façon anecdotique, des membres du comité de suivi de ce projet ont aussi mentionné une réduction des plaintes des riverains à la suite de l'installation d'alarmes large-bande.

- Bénéfices anticipés pour la santé

Quant aux bénéfices relatifs à la santé, Brigade Electronics (2009) prétend à une réduction du risque de dommage auditif parce que: 1) l'énergie du BBS est distribuée sur une plus grande plage fréquentielle de sorte qu'à un même niveau global, l'énergie dans une bande spécifique est moindre que celle contenue dans la bande prédominante d'un son pur; 2) les basses fréquences contenues dans le BBS seraient moins dommageables que les fréquences typiquement retrouvées dans les alarmes tonales, à même niveau SPL; 3) les réflexions et diffractions possibles avec le son pur contribueraient à des niveaux sonores plus élevés. Pour appuyer ce constat, les auteurs citent l'exemple de mesures d'exposition chez les conducteurs de chariots électriques « *A health study by BAA involving noise exposure monitoring resulted in some very high noise readings. Originally thought to be due to faulty meters, a more detailed study identified that the tonal alarms on the passenger terminal electric buggies were being reflected so intensely they created a health problem. Following further studies and a safety review BAA now specifies white sound alarms.* » (Brigade Electronics, 2009). Finalement, on rapporte que le BBS susciterait moins une réaction de sursaut (stress) chez les travailleurs (Brigade Electronics, 2009; Seattle District Safety Gram, 2009).

Il est important de rappeler que les bénéfices rapportés par le manufacturier de l'alarme large-bande ne s'appuient pas toujours sur des fondements théoriques reconnus ou sur des données d'études scientifiques contrôlées et indépendantes.

2.3 Exemples recensés d'utilisation de la technologie BBS

Malgré les nombreux avantages rapportés plus haut, les alarmes de recul large-bande sont peu utilisées au Canada puisqu'elles ne seraient possiblement pas conformes à la norme SAE J994 (2009) qui spécifie que la fréquence prédominante doit se situer entre 700 et 2 800 Hz. Par ailleurs, les critères conçus pour les alarmes de recul conventionnelles ne semblent pas directement applicables au signal BBS. Des mesures subjectives menées par Leventhall (2007) suggèrent que le BBS peut être efficace tout en opérant à des rapports S/B inférieurs au 0 dB requis par la norme ISO 9533 (1989), mettant en doute la validité de ce critère d'ajustement. Il est à noter qu'aucune comparaison avec une alarme tonale conventionnelle n'a été entreprise et que les mesures subjectives ont été effectuées par l'entremise de tâches ne nécessitant pas les ressources cognitives requises lors de l'accomplissement de tâches dans un environnement de travail.

On dénote, par contre, plusieurs exemples d'application ailleurs dans le monde (voir Tableau 3 à l'Annexe B) et les résultats sont généralement favorables, particulièrement pour la réduction des

plaintes de nuisance environnementale. En 2005, la technologie a remporté un prix d'excellence de la Society of Automotive Engineers dans la catégorie des innovations pour la gestion du bruit (SAE International, 2005). Plus encore, les alarmes large-bande sont maintenant incluses dans la réglementation sur le bruit de construction à New York qui impose l'utilisation d'alarmes moins bruyantes (alarmes à bruit blanc ou alarmes tonales réglées à des niveaux plus faibles) après les heures de travail régulières et à proximité de zones sensibles telles que les écoles, les hôpitaux et les résidences pour personnes âgées (City of New York, 2007).

La plupart des exemples proviennent de courts documents, y compris du matériel promotionnel produit par le manufacturier, non soumis à un processus rigoureux de révision par les pairs. Les divers témoignages ne laissent aucun doute quant à la supériorité de cette technologie dans la réduction des plaintes de bruit environnemental. Par contre, peu d'études scientifiques publiées ont démontré les avantages et désavantages d'une telle technologie pour assurer la sécurité des travailleurs (Homer, 2008; Burgess et McCarty, 2009). La section qui suit fait état d'études dans lesquelles on a tenté de comparer la performance des alarmes large-bande aux alarmes tonales, particulièrement pour la détection et l'audibilité des signaux et la localisation auditive.

2.4 Études comparatives

2.4.1 Détection et audibilité

Afin de réduire l'impact des klaxons de train sur la pollution sonore, une étude comparative a été menée par la firme RRK Jones (2004). Au Royaume-Uni, les klaxons doivent être clairement entendus à 400 m devant le train, même dans des conditions défavorables de propagation sonore et de bruit ambiant et en présence de pertes auditives significatives. Le niveau sonore de deux alarmes tonales et de l'alarme large-bande (5 niveaux de puissance) a été mesuré sur des distances allant jusqu'à 400 m devant le train. Pour que l'alarme soit considérée « juste clairement audible » dans cette étude, son spectre devait dépasser d'au moins 15 dB le seuil masqué dans la même bande en tiers d'octave, et le niveau sonore de trois harmoniques ou de trois bandes en tiers d'octave devait excéder le seuil masqué par au moins 10 dB. Des scénarios de perte auditive basés sur la norme ISO 7029 (2000) ont démontré que le BBS n'était pas suffisamment audible dans des conditions défavorables, mais qu'une augmentation du niveau d'environ 3 dB pourrait donner des résultats acceptables. En plus de mesures additionnelles pour vérifier cette affirmation, les auteurs recommandent des tests d'écoute en conditions contrôlées avec des bruits ambiants réels et des mesures de directivité du BBS puisque les résultats n'ont pas aussi réussi à démontrer un patron d'émission sonore supérieur à celui des alarmes tonales.

On affirme dans les dépliants promotionnels que le BBS serait moins susceptible au masquage. Or, des mesures effectuées dans un environnement minier semblent contredire cette affirmation (Homer, 2008). Selon ISO 9533, la différence entre les niveaux sonores mesurés lors de deux séries (série 1 = véhicule à haut régime avec alarme désactivée; série 2 = véhicule au neutre avec alarme fonctionnelle) doit être égale ou supérieure à 0 dB à 7 points de mesure derrière le véhicule. Les résultats de l'étude démontrent 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 large-bande. De plus, le son de l'alarme tonale était projeté sur de plus grandes distances que celui de l'alarme large-bande, couvrant une zone approximativement 45 % plus grande dans un environnement très bruyant. Finalement, le niveau de l'alarme juste derrière le

véhicule dépassait celui du bruit de fond ambiant de 9,6 dBA (114,0-104,4 dBA) pour l'alarme tonale et de 7,4 dBA (111,8-104,4 dBA) pour l'alarme large-bande, ne respectant pas un des critères d'audibilité, soit celui d'au moins 15 dB prescrit par ISO 7731. Aux fins d'analyse, le spectre des alarmes a été comparé à celui du bruit et, selon l'auteur, des similarités spectrales rendent l'alarme à large spectre plus susceptible au masquage que le son pur dans des environnements sonores élevés. Il est important de préciser que les niveaux maxima de chacune des alarmes étaient différents (111,8 vs 114,0 dBA) et que l'étude portait essentiellement sur les niveaux sonores, sans égard au seuil d'audibilité de chacune des alarmes, ce qui limite la portée des résultats. Deux alarmes peuvent avoir la même audibilité à des rapports signal/bruit bien différents ou, inversement, avoir une audibilité bien différente à un même rapport signal/bruit. Aucune donnée sur l'audibilité des alarmes comme telle n'est présentée, alors que c'est cette information qui détermine si l'alarme est détectée ou non par les travailleurs.

Une autre étude comparative examine la propagation sonore derrière les véhicules lourds. L'étude, menée en Australie pour le Department for Transport, Energy and Infrastructure, a évalué la conformité de trois alarmes (alarme large-bande, alarme tonale focalisée et alarme tonale intelligente avec ajustement automatique du niveau) à la norme australienne AS 4742-2003 (équivalente à ISO 9533 : 1989). Les résultats indiquent que l'alarme large-bande et l'alarme tonale focalisée respectent les critères de la norme. Quoique les alarmes dites intelligentes n'y soient pas conformes, une légère modification des méthodes de mesure a permis de démontrer qu'elles peuvent s'ajuster pour être 1-2 dB plus élevées que le bruit de fond de la machine. Une comparaison des niveaux mesurés directement derrière (point central) et à 45° de part et d'autre de la ligne médiane indique que les alarmes focalisées et large-bande démontrent une certaine directivité du son contrairement aux alarmes tonales dites intelligentes et que l'alarme large-bande serait préférable dans les situations où une partie du camion peut obstruer la propagation sonore (Basset Consulting Engineers, 2009). Dans le cadre de cette même étude, une enquête téléphonique a permis de sonder l'opinion des représentants de huit différentes compagnies suivant l'utilisation de l'alarme large-bande. En général, les auteurs ont rapporté l'absence de problèmes de sécurité, une plus grande facilité à identifier le camion émetteur, une attention accrue à la sécurité (nouveau, mais aussi réduction du phénomène d'habituation), une détection du signal derrière le véhicule équivalente à celle de l'alarme conventionnelle, une diminution de la fatigue chez les travailleurs et opérateurs de véhicules lourds et une réduction considérable des plaintes dues au bruit, particulièrement la nuit. La méthodologie détaillée du sondage téléphonique n'est pas documentée ce qui soulève des interrogations quant à la validité des résultats et conclusions rapportés.

Le port de protecteurs auditifs est important à prendre en considération puisqu'il peut avoir des conséquences significatives sur l'audibilité des signaux avertisseurs. En général, pour des bruits supérieurs à 85 dBA, les protecteurs auditifs conventionnels ne semblent pas nuire à la détection des sons et la perception de la parole et peuvent même les améliorer chez des auditeurs normaux (Casali et coll., 2004). Par contre, ils réduisent l'audibilité en présence de bruits plus faibles (Berger et Casali, 1997) et peuvent particulièrement nuire à la détection des sons (Robinson et Casali, 1995) et à la perception de la parole (Giguère et coll., 2010) chez les gens atteints d'une perte auditive si les signaux sont atténués à des niveaux inférieurs aux seuils auditifs.

Robinson et Casali (1995) ont démontré qu'une alarme tonale demeurerait audible dans des bruits supérieurs à 85 dBA à des rapports S/B relativement faibles (0 dB), même en présence d'une

perte auditive importante (45-50 dB HL), lors du port d'un casque protecteur passif. Ils ont alors conclu que les travailleurs avec une telle atteinte devraient entendre l'alarme si la norme ISO 7731 est respectée (si le niveau de l'alarme dépasse celui du bruit de fond ambiant d'au moins 15dB). Pour leur part, les protecteurs actifs, qui offrent une protection contre les niveaux élevés mais permettent la transmission des signaux faibles, ne semblent pas améliorer significativement le seuil masqué des alarmes chez des gens avec audition normale (Casali et Wright 1995; Lovejoy, 2008) ou avec perte auditive (Lovejoy, 2008), comparativement aux protecteurs passifs.

Casali et coll. (Casali et coll., 2004; Christian Dabney, 1999) ont également comparé la performance de coquilles et bouchons passifs à ceux de protecteurs avec réduction active de bruit dans la détection d'une alarme conventionnelle dans des bruits de 85 et 100 dBA, chez des auditeurs normaux impliqués dans une autre tâche. Une condition sans protecteurs a également été entreprise à 85 dBA. À 100 dBA, les seuils masqués étaient meilleurs pour les bouchons passifs, et le casque avec réduction de bruit offrait un avantage sur le casque passif. À 85 dBA, aucune différence n'a été notée entre les divers protecteurs, mais une amélioration des seuils masqués d'environ 2,6-4,3dB était évidente comparativement à la condition sans protection.

En ce qui concerne la détection sonore, à notre connaissance, une seule étude a comparé l'alarme tonale (Preco 6003) à l'alarme large-bande (BBS-97) lors du port de protecteurs auditifs passifs et actifs (Alali, 2011). Dans un bruit de fond extérieur d'environ 52,3 dBA, la distance de détection a été évaluée chez 12 auditeurs normaux dans huit conditions d'écoute (sans protection et avec sept divers types de protecteurs). La distance moyenne de détection s'est avérée moins grande pour un casque passif (1132,2 pieds) et plus grande pour la condition sans protection (1652,3 pieds). Outre le casque passif et un bouchon passif (caractérisés par une atténuation plus importante), les protecteurs ne semblaient pas augmenter significativement la distance à laquelle l'alarme devenait audible. Finalement, les résultats démontrent un avantage de 221,5 pieds dans la détection de l'alarme tonale (1600,9 pieds) comparativement à l'alarme large-bande (1379,4 pieds). L'auteur interprète cette différence comme un avantage important permettant de détecter l'alarme tonale sur une plus grande distance, ce qui procure un délai plus long pour réagir. Il faut toutefois être prudent avant de déduire que l'alarme tonale est nécessairement plus sécuritaire. Si l'alarme est entendue sur une plus longue distance, mais qu'elle est ignorée (phénomène d'habituation ou confusion avec un autre camion qui recule), ou que son niveau diminue en s'approchant du travailleur par le phénomène d'interférence des ondes sonores (Laroche et coll., 1995) et que celui-ci croit plutôt que le camion s'éloigne, le temps de réaction supplémentaire n'aurait aucun impact et la sécurité serait plutôt compromise qu'améliorée. Plusieurs facteurs doivent donc être pris en considération avant de déterminer laquelle des alarmes est supérieure en matière de sécurité.

2.4.2 Localisation auditive

En général, il est plus facile de localiser un signal riche en composantes fréquentielles qu'un signal avec un contenu spectral limité (p. ex. Butler et Planert 1976; Butler, 1986; Trahiotis et Stern; 1989; Butler et Humanski, 1992; Hofman et Van Opstal, 1998; Racanzone et coll., 1998). Deborah Withington, la conceptrice des alarmes de recul large-bande, a démontré un avantage des signaux large-bande comparativement aux sirènes conventionnelles sur les véhicules d'urgence (Withington 1996, 1999, 2000; Withington and Paterson 1998).

En ce qui concerne les alarmes de recul, les résultats d'un sondage impliquant 1477 véhicules (dont 313 équipés d'une alarme large-bande) indiquent que quoique les deux types d'alarme soient efficacement reconnues comme un signal avertisseur de danger, l'alarme large-bande est plus facile à localiser et provoque moins de nuisance sonore que l'alarme tonale. De fait, 80 % des répondants ont affirmé pouvoir toujours identifier correctement le camion qui recule en actionnant une alarme large-bande, comparativement à seulement 10 % pour celui équipé d'une alarme tonale, et tous ont répondu que l'alarme large-bande était moins gênante (Withington, 2004).

En 2005, le National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH) a financé une étude sur la localisation des alarmes dans des conditions contrôlées à Washington State University (Lakatos et Miller, 2009). Deux expériences ont été menées en laboratoire, sous écouteurs, à partir d'enregistrements binauraux de signaux d'alarme réalisés lors de deux simulations d'approche d'un véhicule en marche arrière le long de trajectoires menant à un impact direct (« direct hit ») ou à un quasi impact (« near miss »). Les résultats n'ont pas démontré d'avantage probant en faveur d'un signal d'alarme tonal ou d'un signal large-bande. Une contrainte importante de cette étude était l'utilisation de fonctions de transfert binaurales génériques (mannequin KEMAR) plutôt que naturelles (propres à chaque participant), ce qui a nécessité l'élimination des essais pour lesquels une confusion avant-arrière est survenue dans la perception de l'approche du véhicule par les participants. Ce type d'erreur est toutefois le plus important à considérer du point de vue de la sécurité.

Afin d'assurer une sécurité optimale et de tirer avantage des bénéfices propres aux alarmes tonales et bruitées, Catchpole et coll. (2004) ont étudié différents signaux combinant les caractéristiques des deux types d'alarme. Dans une première tâche de localisation, huit participants avec audition normale devaient indiquer si le signal présenté (bruit blanc, bruit blanc avec bande de rejet entre 1000 et 3000 Hz, bruit blanc avec bande de rejet entre 1000 et 10000 Hz, son pur de 2000 Hz, balayage fréquentiel ascendant entre 1000 et 3000 Hz, et balayage fréquentiel descendant entre 3000 et 1000 Hz) provenait de la droite ou de la gauche. La localisation était supérieure et plus rapide avec les bruits qu'avec les signaux tonaux tandis que les performances étaient meilleures pour le bruit blanc et plus pauvres pour le son pur à 2000 Hz. Dans une seconde tâche, les mêmes participants devaient identifier le signal entendu tout en effectuant la tâche de localisation. Six stimuli ont été utilisés, soit les trois signaux tonaux individuellement et en combinaison avec le bruit blanc avec bande de rejet (1000-3000 Hz). La localisation s'est avérée meilleure et plus rapide pour les signaux composés que pour les stimuli tonaux, indiquant qu'il est possible d'augmenter l'efficacité d'une alarme tonale en y ajoutant un bruit. Finalement, dans une troisième partie de l'étude, 18 participants ont estimé, sur une échelle de 0 à 100, le degré d'urgence évoqué par trois stimuli (bruit + balayage ascendant, bruit + balayage descendant et bruit + complexe tonal à cinq harmoniques). En général, le balayage ascendant était jugé plus urgent que le balayage descendant, qui était lui-même jugé plus urgent que le complexe tonal. Bien que l'ajout de bandes de bruit à un signal tonal pourrait améliorer la sécurité derrière les véhicules lourds comparativement à l'alarme tonale (du moins pour la localisation), la nuisance sonore n'en serait pas pour autant nécessairement réduite. Cette dualité entre la sécurité et la nuisance sonore est au cœur de la problématique.

Le port de protecteurs auditifs est aussi important à considérer dans l'analyse des capacités de localisation auditive; l'effet des protecteurs passifs étant généralement néfaste (Berger, 2003;

Berger et Casali, 1997; Nixon et Berger, 1998; Noble et coll. 1990; Atherley et Noble 1970; Abel et Hay 1996; Noble et Russell; 1972; Simpson et coll. 2005; Bolia et coll. 2001). À notre connaissance, seules quelques études ont examiné spécifiquement l'effet des protecteurs auditifs sur la localisation des alarmes de recul conventionnelles comparativement à des alarmes à spectre modifié (Alali et Casali, 2011; Casali et Alali, 2010; Alali, 2011).

Dans une première étude, Alali et Casali (2011) ont évalué l'effet de sept protecteurs auditifs sur la capacité d'individus avec audition normale à localiser une alarme conventionnelle et une alarme modifiée (composantes additionnelles à 400 et 4000 Hz) dans deux niveaux (60 et 90 dBA) de bruit rose. Les alarmes étaient présentées par huit haut-parleurs cachés, couvrant 360°, dans huit conditions de protection auditive, soit sans protection auditive, avec quatre bouchons (deux passifs et deux « augmentés ») et avec trois casques (un passif, un actif dichotique et un actif diotique). Les participants devaient indiquer la position perçue de la source, au degré près. Les mouvements de tête étaient permis et le niveau de l'alarme augmentait à l'intérieur d'une même présentation afin de simuler un véhicule qui s'approche à une vitesse de 10 mph. Pour chacune des variables dépendantes, seule la performance avec le casque diotique s'est avérée différente de toutes les autres conditions d'écoute avec et sans protection auditive, un résultat qui pourrait être expliqué par la perte des indices binauraux lors de l'utilisation d'un seul microphone. Dans l'ensemble, la localisation était supérieure dans le plan gauche/droit comparativement au plan avant/arrière et supérieure dans le bruit plus faible comparativement au bruit fort, avec une augmentation notable des confusions avant/arrière dans ce dernier. Finalement, les résultats soulèvent certains avantages pour l'alarme modifiée dans un niveau de bruit élevé comparativement à l'alarme conventionnelle, soit: 1) une réduction de l'erreur angulaire d'environ 5 % (jusqu'à 10 % avec certains protecteurs auditifs et 5 % sans protection); 2) une chute du pourcentage d'erreurs gauche/droit d'environ 10 % pour certains protecteurs et de 4 % sans protection; 3) une réduction des confusions avant/arrière d'environ 3,5 %; 4) une amélioration du pourcentage de localisation d'environ 10 % pour certains protecteurs et de 3 % sans protection. Selon cette étude, les nouvelles technologies de protection auditive ne semblent pas améliorer la localisation comparativement aux protecteurs conventionnels passifs. La localisation sans et avec protection auditive (à l'exception du casque diotique) était par ailleurs relativement bonne (localisation correcte = 64,6-83,9 %; erreurs gauche/droite = 2,4-9,0 %; erreurs avant/arrière = 4,0-12,7 %; déviation absolue = 11,8-28,1%). Il aurait été intéressant de pouvoir quantifier la contribution des mouvements de tête puisque Noble (1981), par exemple, a démontré que la localisation horizontale d'un bruit à bande étroite centré sur 1000 Hz pouvait être améliorée par les mouvements de tête lors du port d'un casque protecteur (24 % sans mouvements; 50 % avec mouvements), alors qu'une performance presque parfaite (95 %) était notée sans protection lorsque les participants pouvaient bouger la tête. Les chercheurs ont par la suite poursuivi l'étude en comparant la performance d'un bouchon électronique à celle sans protection auditive chez un autre groupe de participants, et les résultats furent très similaires dans les deux cas (Casali et Alali, 2010).

3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'état des études sur les alarmes de recul ne fait pas l'unanimité quant à la supériorité de la nouvelle technologie d'alarme large-bande comparativement aux alarmes tonales conventionnelles pour assurer la sécurité des travailleurs à proximité des véhicules en marche arrière. L'objectif général de l'étude est de vérifier si la technologie récente des alarmes de recul large-bande améliore la sécurité des travailleurs qui portent ou non des protecteurs auditifs. Il est à noter que ce projet vise uniquement la dimension santé et sécurité du travailleur liée à la problématique des alarmes de recul et ne s'attaque pas à la nuisance environnementale.

Plus particulièrement, les objectifs suivants sont poursuivis :

1. S'assurer de la conformité de l'alarme large-bande avec la norme SAE J994 (2009) ;
2. Vérifier si le phénomène d'interférence des ondes sonores des alarmes de recul tonales conventionnelles persiste avec la nouvelle technologie large-bande, en mesurant des patrons d'immission sonore derrière les véhicules selon la norme ISO 9533 (points récepteurs fixes) et à l'aide de balayages microphoniques (cartographie) et ce, dans divers environnements de travail ;
3. Comparer la performance de trois différents types d'alarme de recul : tonale conventionnelle (un seul son pur fixe), multi-tonale (trois sons purs fixes) et large-bande de fréquences (bruit) lors de tâches psychoacoustiques (seuils de détection sonore, égalisation de la sonie, évaluation du degré d'urgence et localisation auditive) chez des auditeurs normaux portant ou non des protecteurs auditifs, dans des bruits typiques des milieux de travail où les véhicules sont appelés à reculer ;
4. Proposer des recommandations quant à l'utilisation des alarmes de recul large-bande de fréquences, s'il est démontré que ces dernières sont plus avantageuses.

4. MÉTHODE

Afin d'évaluer et de comparer les trois types d'alarme proposés dans cette étude, deux catégories de mesures ont été considérées. Les mesures dites « objectives » consistaient à décrire le champ sonore généré derrière un véhicule lorsque l'alarme est en fonction. Par des mesures microphoniques, on cherchait à examiner si le champ sonore était bien uniforme derrière un véhicule pour chaque type d'alarme. Ces mesures ont été effectuées en milieu de travail avec des véhicules et des terrains représentatifs de conditions réelles de fonctionnement. D'autre part, les mesures dites « subjectives » faisaient intervenir des participants que l'on soumettait à diverses épreuves psychoacoustiques. Ces tests, conduits en laboratoire, visaient à évaluer la perception des alarmes sous différents aspects décrits plus loin (seuils de détection, égalisation de la sonie, évaluation du degré d'urgence, localisation auditive). Les prochaines sections détaillent le choix des alarmes de recul et les méthodes utilisées pour les mesures objectives et subjectives.

4.1 Sélection des alarmes de recul

Trois types d'alarme ont été retenus : 1) tonale, 2) multi-tonale et 3) large-bande. Le contenu spectral² des alarmes est montré à la Figure 2 tandis que les caractéristiques principales des alarmes sont présentées à l'Annexe C. On y retrouve notamment la trace temporelle des signaux générés par les alarmes ainsi que des courbes illustrant les patrons de directivité des alarmes sélectionnées en milieu semi-anéchoïque.

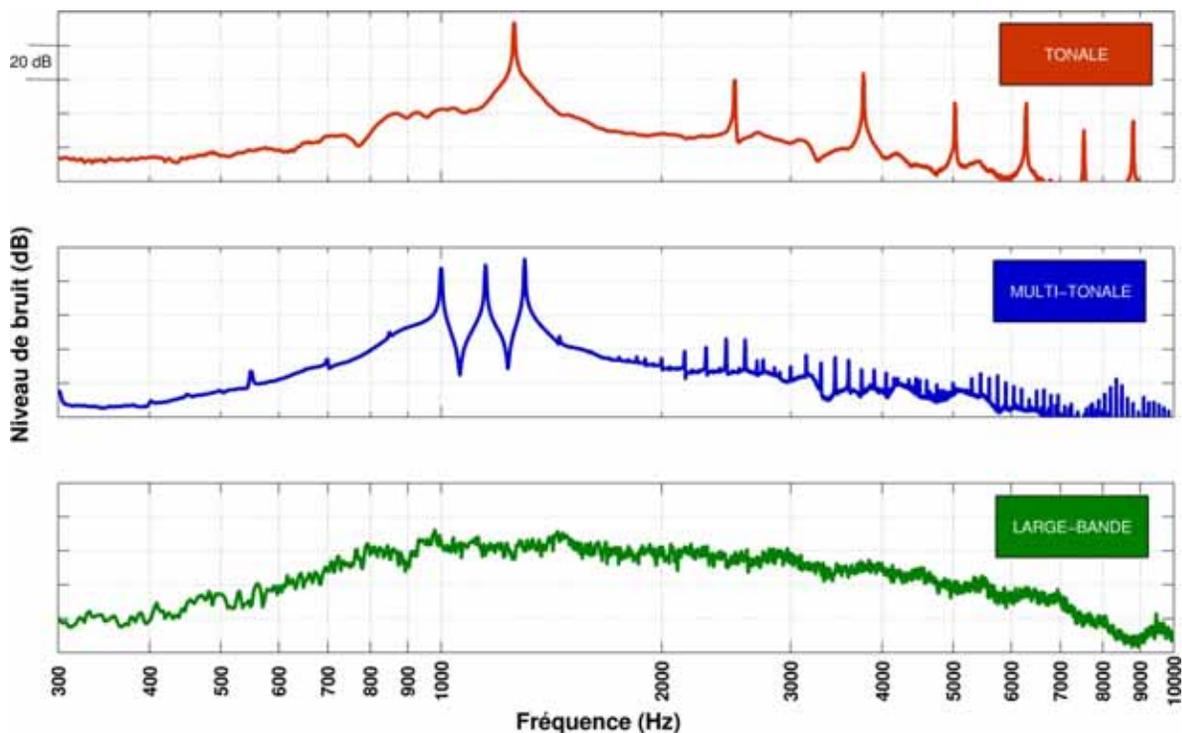


Figure 2 : Représentation du contenu spectral des alarmes

² Les niveaux de bruit présentés ont été obtenus à l'aide d'enregistrement microphonique d'une durée de 20s à environ 1 m derrière un véhicule immobile avec l'alarme en fonction.

4.1.1 Alarme tonale

L'alarme tonale utilisée était une alarme de marque Grote, modèle 73030 (Grote 2011). Cette alarme utilise le signal classique bien connu de type « beep-beep » que l'on retrouve sur la grande majorité des véhicules. Elle consiste principalement en un son pur situé autour de 1264 Hz ainsi que ses harmoniques à plus hautes fréquences, beaucoup plus faibles. Chaque cycle de l'alarme a une durée nominale de 990 ms comprenant un « beep » de 500 ms et une pause de 490 ms.

4.1.2 Alarme multi-tonale

L'alarme multi-tonale, non commercialisée, est inspirée de recommandations de Laroche (1995) dans une étude sur les caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul. Lors de cette étude, il a été possible de déterminer que le signal d'alarme le plus audible était de type pulsé et qu'il devrait comporter trois fréquences : 1000, 1150 et 1300 Hz. Il a donc été convenu d'inclure cette alarme dans l'étude afin de comparer celle-ci avec les alarmes tonale et large-bande. Le signal multi-tonal a été synthétisé numériquement et généré à l'aide du dispositif de l'alarme Grote 73030 en remplaçant le signal tonal intégré à l'unité par le signal simulé externe constitué des trois fréquences à 1000, 1150 et 1300 Hz. La trace temporelle de l'alarme multi-tonale est identique à celui de l'alarme tonale.

4.1.3 Alarme large-bande (BBS)

L'alarme large-bande qui fut utilisée est la BBS-107 Heavy duty commercialisée par la compagnie Brigade Electronics (Brigade electronics 2011). L'énergie acoustique produite par cette alarme est répartie sur un plus large spectre allant principalement de 700 Hz à 4000 Hz. Le signal produit par cette alarme sonne comme un « pschitt- pschitt » plutôt que le « beep-beep » des alarmes conventionnelles. Chaque cycle de l'alarme a une durée nominale de 770 ms comprenant un « pschitt » de 400 ms et une pause de 370 ms.

4.2 Mesures objectives - champ sonore derrière les véhicules

Il existe très peu de protocoles d'essais normalisés qui permettent l'évaluation d'alarme de recul en milieu de travail. La norme ISO 9533 (1989) prescrit une méthode d'essai acoustique et établit les critères nécessaires pour évaluer la performance sonore d'avertisseurs montés sur des engins de terrassement et destinés à avertir le personnel du danger potentiel d'un engin en mouvement. Les essais, effectués sur un véhicule dans des conditions statiques, sont réalisés pour un véhicule et une alarme bien déterminés. Afin d'évaluer différents types d'alarme sur différents véhicules et de rendre la méthode plus instructive et flexible, l'approche décrite dans la norme ISO 9533 a été utilisée avec modifications. De ces modifications ont découlé deux séries d'essais qui sont présentées dans les deux sections suivantes.

4.2.1 Série 1 – Ajustement du niveau des alarmes

Dans cette série de mesure, un véhicule lourd immobile équipé de l'alarme de recul est utilisé. Sept microphones sont placés derrière le véhicule selon les dispositions tirées de la norme ISO 9533 et présentées à l'Annexe D. Dans une première étape, le moteur du véhicule est mis en

marche à vide à la vitesse maximale régulée (transmission au point mort, moteur à haut régime). Pour chacun des sept microphones, les niveaux de bruit³ sont mesurés. Ensuite, le moteur du véhicule est éteint et l'alarme mise en fonction. Le niveau de l'alarme est alors ajusté manuellement de sorte que les niveaux de bruit à tous les microphones soient au moins égaux ou supérieurs aux niveaux obtenus dans la première étape (moteur à haut régime, alarme éteinte). Autrement dit, on cherche à ajuster le niveau de l'alarme afin d'obtenir un rapport signal/bruit (S/B) supérieur ou égal à 0 dB à tous les microphones. L'opération est alors répétée pour chacune des alarmes retenues. Cette approche permet de comparer les valeurs de S/B obtenues à tous les microphones pour chacune des alarmes et ainsi de déterminer si certains types d'alarme génèrent plus de variations que d'autres⁴.

Pour chacune des alarmes, deux conditions d'installation sur le véhicule ont été considérées : 1) une dite « réaliste » où l'alarme était placée à l'endroit où elle se trouvait lors de l'arrivée du véhicule; 2) une dite « idéale » où l'alarme était placée bien en vue au centre du véhicule, pointant vers l'arrière de celui-ci. La Figure 3 montre des exemples d'installation d'alarmes dans les conditions « idéale » et « réaliste ».

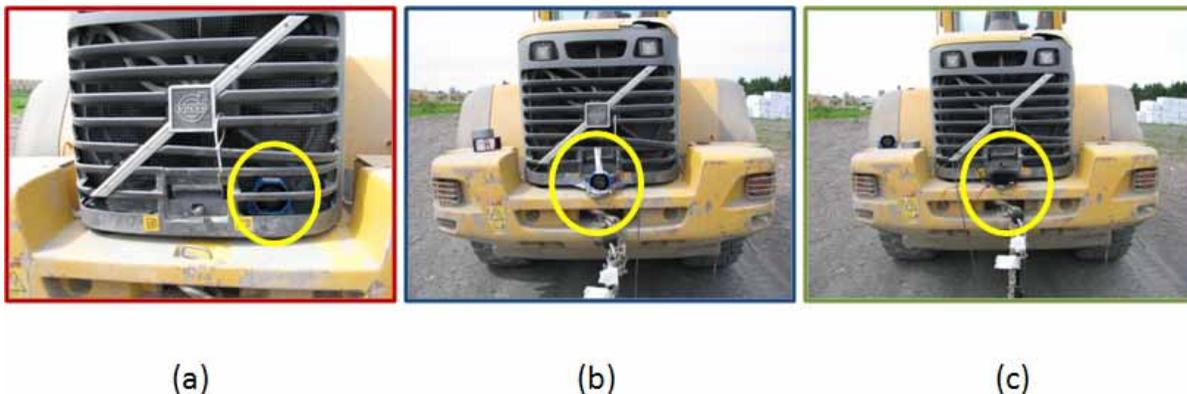


Figure 3 : Exemples d'installation des alarmes sur un véhicule : a) alarme Grote en condition « réaliste »; b) alarme Grote en condition « idéale »; c) alarme BBS en condition « idéale ».

4.2.2 Série 2 – Homogénéité du champ sonore

Afin d'examiner plus en détail la distribution du champ sonore généré par une alarme derrière un véhicule, une seconde série de mesures a été effectuée. Ces mesures consistaient à enregistrer en continu, à l'aide d'un microphone, le signal sonore derrière le véhicule le long de différentes lignes lorsque l'alarme était en fonction. Ces lignes de balayage sont montrées à l'Annexe D. Elles sont constituées de neuf lignes droites (notées de 1 à 9) et de deux arcs de cercle situés à, respectivement, 2 et 4 m du véhicule. Pour chacune des lignes 1 à 9, un balayage d'environ 30 à

³ L_{FMAX} , pondération de temps rapide, pondération en fréquence A, durée de la mesure : 20 s

⁴ La norme ISO 9533, à la différence de ce qui est proposé ici, spécifie que l'on doit enregistrer le rapport signal/bruit avec l'alarme mise en fonction au volume que l'on retrouve lors de son installation et utilisation normale. Ce rapport S/B doit être égal ou supérieur à 0 dB pour que l'alarme évaluée soit jugée conforme à la norme.

40 s a été effectué à vitesse constante⁵. Pour les deux arcs de cercle, le temps de balayage était supérieur aux cas des lignes 1-9. Lors de ces mesures, le niveau respectif de chacune des alarmes était fixé au niveau obtenu lors de la première série de mesure décrite à la section précédente. Une fois les mesures terminées, les signaux temporels étaient analysés à l'aide de routines de calcul développées sous MATLAB pour obtenir des niveaux L_{eq} à toutes les secondes et donc en différents points de l'espace derrière le véhicule. Un algorithme d'interpolation a ensuite été utilisé pour générer des cartes du niveau sonore des alarmes. L'opération a été répétée pour chacune des alarmes. Les résultats issus de cette série de mesures permettent ainsi de comparer la distribution du champ sonore généré par les alarmes utilisées directement derrière le véhicule.

4.2.3 Sélection des lieux de mesures

Le choix des lieux pour les mesures terrain a été fait en concertation avec les membres du comité de suivi formé au début du projet. Un des objectifs était de pouvoir faire des mesures sur différents types de véhicules et de terrains, mais aussi différents environnements sonores. Deux compagnies ont donné accès à l'équipe de recherche et les tests ont été conduits sur trois différentes combinaisons véhicules/sol telles que présentées à l'Annexe E. Le type d'industrie dans lequel œuvrent les compagnies visitées est aussi indiqué à titre informatif.

4.2.4 Sélection des ambiances sonores

Des enregistrements sonores de bruits de différentes natures ont aussi été effectués lors des visites des lieux de mesures. Ces enregistrements ont été utilisés pour être reproduits en laboratoire pour les tests subjectifs (épreuves psychoacoustiques). L'objectif était ici de recréer en laboratoire des ambiances sonores se rapprochant le plus possible de conditions réelles obtenues en milieu de travail en choisissant des bruits présentant différents niveaux, contenu fréquentiel (plus ou moins de basses et hautes fréquences) ainsi que différents caractères temporels. Quatre enregistrements sonores ont été retenus et le contenu fréquentiel de ceux-ci est montré à la Figure 4. Une brève description de ces bruits et de l'environnement dans lequel ils ont été échantillonnés est donnée à l'Annexe E.

⁵ Le balayage était effectué manuellement par un membre de l'équipe en utilisant une perche au bout de laquelle était fixé le microphone. La vitesse était maintenue la plus constante possible en marchant lentement tout en tendant la perche.

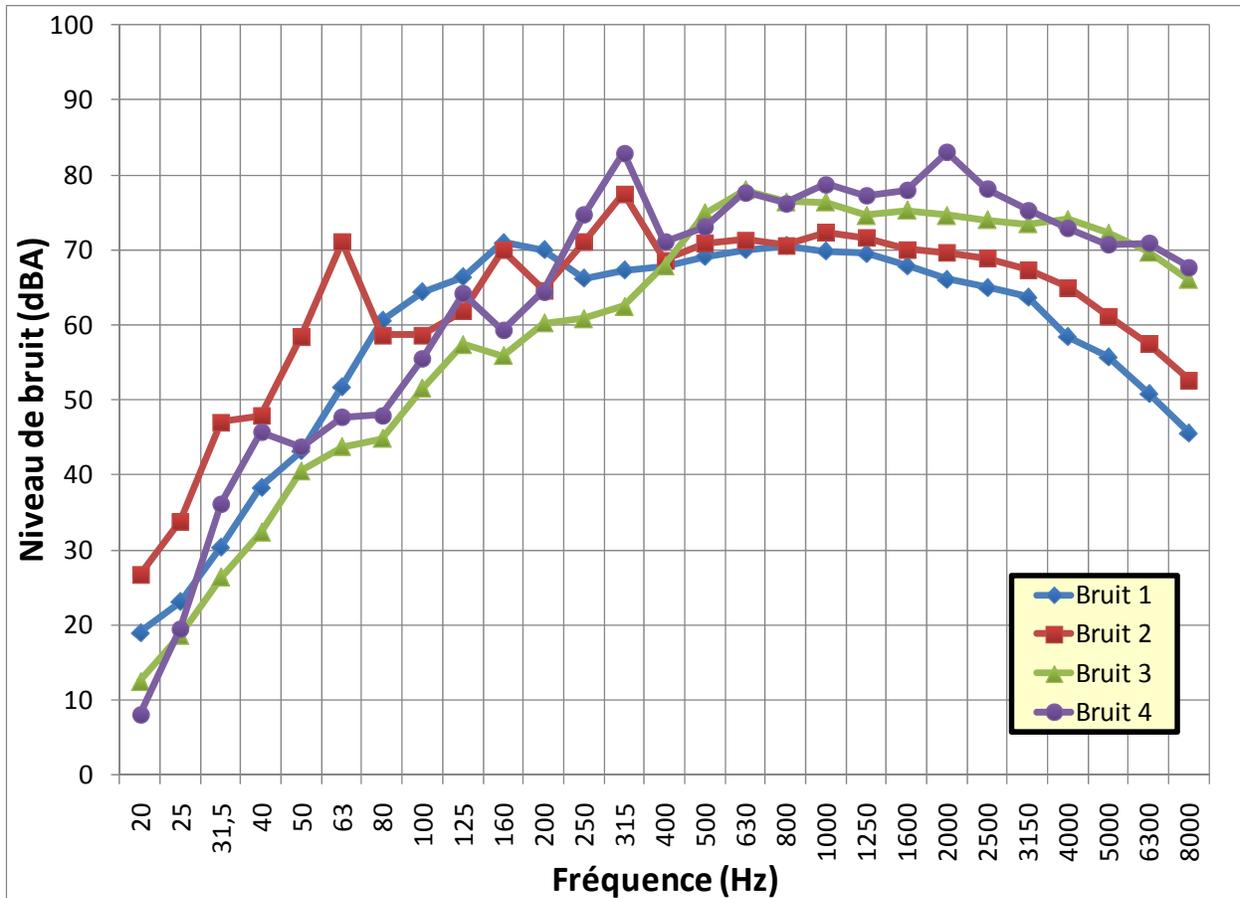


Figure 4 : Spectre des quatre bruits retenus. Niveaux sonores globaux : Bruit 1 – 80,5 dBA; Bruit 2 – 83,3 dBA; Bruit 3 – 85,9 dBA; Bruit 4 – 89,6 dBA.

4.3 Mesures subjectives - épreuves psychoacoustiques

4.3.1 Participants

Vingt-quatre jeunes adultes âgés de 22 à 31 ans (moyenne = 25,0 ans ; écart-type = 2,3 ans) ont participé aux épreuves psychoacoustiques effectuées en laboratoire. Tous les participants rencontraient 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) histoire otologique négative, et 3) 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 to +50 daPa) [selon Martin et Clark, 2003].

4.3.2 Dépistage auditif

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 se sont effectués selon les politiques de déontologie en vigueur au Bureau d'éthique et d'intégrité de la recherche à l'Université d'Ottawa (certificat H12-09-01). 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 également été effectué à l'aide d'un audiomètre clinique (Interacoustics AC 40) couplé à des écouteurs Telephonics TDH-39P. Des sons de différentes fréquences (entre 250 et 8000 Hz) ont alors été présentés sous écouteurs et les participants devaient indiquer lorsqu'un son était entendu en appuyant sur un bouton presseur. Les participants qui satisfaisaient à tous les critères de sélection ont par la suite été invités à participer aux tests d'écoute décrits dans les paragraphes suivants.

4.3.3 Conditions expérimentales en laboratoire

Lors des mesures en laboratoire, les participants devaient effectuer quatre tâches d'écoute, soit des mesures de seuils de détection, d'égalisation de la sonie, d'évaluation du degré d'urgence et de localisation auditive, avec et sans protecteurs auditifs. Deux sessions d'évaluation d'environ 90 à 120 minutes étaient requises pour administrer les divers tests d'écoute, soit une première session dédiée aux trois premières tâches d'écoute et la seconde aux mesures de localisation sonore. Un protecteur de type coquille (PELTOR Optime 95; NRR⁶ = 21 dB) avait été assigné aléatoirement à la moitié des participants alors qu'un protecteur de type bouchon (EAR Ultrafit; NRR = 25 dB) était utilisé par les douze autres participants. Les mesures ont été effectuées dans des cabines insonorisées du Laboratoire de recherche en audition de l'Université d'Ottawa. Une description des mesures ainsi que des équipements utilisés est présentée à l'Annexe F.

4.3.4 Seuils de détection

Les seuils de détection peuvent être définis comme étant le niveau de présentation sonore auquel l'individu perçoit correctement le signal présenté, 50 % du temps. Afin de familiariser le participant avec les signaux utilisés, les trois alarmes et les quatre bruits ont premièrement été présentés dans le champ sonore. Par la suite, une étape de familiarisation a été entreprise dans le silence. Une mesure de seuil était alors effectuée pour chaque type d'alarme. À l'aide d'un ordinateur tablette et d'un stylet, le participant devait ajuster (en sélectionnant les symboles « + » et « - ») le niveau d'une première alarme en utilisant un pas de 2 dB jusqu'à ce que cette dernière soit tout juste perceptible lors d'une excursion ascendante. Lorsque satisfait de sa réponse, le participant devait répéter la même procédure avec les deux autres alarmes, pour ensuite appuyer sur la touche « terminer » afin d'enregistrer ses réponses et de passer au prochain essai. Chaque essai comprenait donc trois mesures de seuil, soit un seuil par alarme. Après l'étape de familiarisation, la procédure a été répétée dans le silence et dans chacune des quatre conditions de bruit, l'ordre de présentation des bruits et des alarmes ayant été au préalable déterminé pour chaque participant afin d'assurer un contrebalancement des conditions. Le niveau initial des alarmes variait d'une alarme à l'autre et entre les divers essais, mais était toujours plus élevé que celui du seuil attendu. Chaque condition a également été répétée afin de déterminer la fiabilité des seuils mesurés en utilisant une telle approche. Au total 20 essais représentant 60 seuils ont été effectués, soit 10 essais (30 seuils) sans protecteurs auditifs et 10 essais (30 seuils) avec protection auditive (coquille ou bouchon).

⁶ NRR = Noise Reduction Rating

4.3.5 Égalisation de la sonie

La sonie réfère à la perception subjective de la force sonore d'un signal. La sonie dépend non seulement du niveau de pression sonore, mais aussi des autres caractéristiques acoustiques du signal tel que le contenu fréquentiel et la durée, ainsi que des caractéristiques du bruit. Afin d'évaluer la sonie des différentes alarmes de recul, une approche par égalisation de la sonie a été utilisée, le signal de référence étant toujours l'alarme conventionnelle présentée à un rapport signal-sur-bruit de 0 dB dans chacun des quatre bruits (donc à 81 dBA, 83 dBA, 86 dBA et 89 dBA dans les bruits 1, 2, 3 et 4, respectivement). À partir de l'ordinateur tablette, le participant devait activer et écouter l'alarme conventionnelle. Par la suite, il devait activer la prochaine alarme et ajuster son niveau (à l'aide des touches « + » et « - »), jusqu'à ce la sonie des deux alarmes soit jugée équivalente. Une fois satisfait, le participant pouvait passer à l'ajustement de la dernière alarme. Le participant était encouragé à répéter la procédure plusieurs fois, jusqu'à ce qu'il soit satisfait de ses réponses, après quoi il pouvait enregistrer celles-ci en appuyant sur la touche « terminer ». Un essai consistait donc en l'ajustement du niveau sonore de deux alarmes afin d'atteindre une sonie équivalente à celle du signal de référence (donc deux comparaisons). Une pratique dans un des quatre bruits a permis de familiariser le participant avec la tâche. Par la suite, la procédure a été répétée quatre fois sans protection auditive (soit un essai par bruit) et quatre fois avec protection auditive (coquille ou bouchon), pour un total de 16 comparaisons. L'ordre de présentation des bruits et des alarmes était contrebalancé entre les participants.

4.3.6 Évaluation du degré d'urgence

Deux sons ayant la même sonie ne véhiculent pas nécessairement le même degré d'urgence. Tout comme la sonie, la perception du degré d'urgence évoqué par un signal dépend non seulement du niveau sonore, mais aussi de plusieurs caractéristiques acoustiques propres au signal (Hellier et Edworthy, 1989; Edworthy et coll., 1991; Edworthy et Stanton, 1995; Haas et Casali, 1995; Haas et Edworthy, 1998), incluant le contenu fréquentiel, l'aspect temporel et la familiarité avec le signal comme avertisseur de danger. Lors de cette tâche, les trois alarmes étaient présentées de façon aléatoire à trois différents rapports signal-sur-bruit, soit -6 dB, 0 dB et 6 dB. Le participant devait évaluer le degré d'urgence évoqué par le signal entendu sur une échelle glissante de 0 à 100, 0 représentant un signal évoquant très peu le sentiment d'urgence et 100 étant représentatif d'un signal très urgent. Lors d'un essai, neuf jugements d'urgence étaient ainsi requis, soit un jugement pour chacune des alarmes présentées à chacun des trois niveaux de présentation dans un bruit donné. Après chaque jugement, le participant devait appuyer sur la touche « suivant » pour entendre le prochain signal. L'étape de familiarisation consistait à neuf jugements dans un bruit en particulier. Par la suite, le processus a été repris pour chacun des quatre différents bruits, avec et sans protection auditive (coquille ou bouchon) pour un total de 72 jugements (9 jugements × 4 bruits × 2 conditions de protection auditive). L'ordre de présentation des bruits, des alarmes et des niveaux de présentation était choisi aléatoirement par le système.

4.3.7 Localisation auditive

Les performances de localisation auditive ont été mesurées dans une seule condition de bruit (le bruit 2 ajusté à 80 dBA), en présentant un signal d'alarme de 3 s par l'entremise de 12 haut-parleurs disposés sur un arc de 180°, chaque haut-parleur étant séparé de ses voisins par 15°. Le

signal d'alarme était présenté aléatoirement par les divers haut-parleurs. Puisque le cycle de répétition de l'alarme large-bande de fréquences est plus court que celui de l'alarme tonale et de l'alarme multi-tonale, le stimulus entendu consistait en quatre cycles (« pschtt, pschtt, pschtt, pschtt ») pour l'alarme large-bande et en trois cycles pour les deux autres types d'alarme (« beep, beep, beep »). Aussi, afin de simuler l'approche d'un camion en manœuvre de recul à une vitesse de 10 mph (4,4 m/s), le niveau sonore était augmenté à chaque cycle successif de l'alarme selon la règle de dispersion sphérique (+6 dB à chaque fois que l'on coupe la distance de moitié) pour atteindre 80 dBA à la fin du signal d'alarme, soit un rapport S/B de 0 dB, deux secondes (8.8 m) avant l'impact présumé. Le sursis de deux secondes est basé sur la norme SAE J1741 (1999) et correspond au délai entre le moment où un son avertisseur est entendu et le moment où la personne réagit.

À l'aide d'un chiffre de 1 à 12, l'individu devait indiquer le haut-parleur ayant émis le signal. Une fiche illustrant l'emplacement des haut-parleurs était mise à la disposition des participants. Afin de pouvoir évaluer les performances dans la condition de localisation la plus difficile et d'éviter que la comparaison des résultats obtenus avec les différentes alarmes soit limitée par des effets potentiels de plafond, les mouvements de la tête n'étaient pas permis. Deux conditions de localisation ont été évaluées, soit la localisation dans le plan horizontal gauche/droit (l'individu faisant dos au milieu de l'arc de localisation) et la localisation dans le plan horizontal avant/arrière (l'individu faisant face soit à la position « 0° » ou la position « 180° »), permettant ainsi de rendre compte des deux types d'erreur de localisation (confusions droite/gauche et avant/arrière) possibles dans le plan horizontal. La familiarisation consistait à présenter le stimulus d'alarme (une alarme donnée) par chacun des haut-parleurs lors d'un balayage des positions 1 à 12 dans la condition avec les haut-parleurs placés derrière le participant. Lors de l'évaluation des performances de localisation, chaque type d'alarme a été présenté aléatoirement par chacun des haut-parleurs dans chacune des trois conditions expérimentales (haut-parleurs placés derrière, à la droite et à la gauche), avec et sans protection auditive, pour un total de 432 présentations (216 sans protection auditive et 216 avec protection auditive - coquille ou bouchon). Afin de limiter les changements de position du participant, chaque alarme était présentée à tour de rôle dans une condition donnée avant d'entreprendre une autre condition. L'ordre de présentation des conditions et des alarmes dans chacune des conditions était contrebalancé entre les divers participants.

5. RÉSULTATS

5.1 Conformité avec la norme SAE J994

Pour être conforme à la norme SAE J994 (2009), une alarme de recul doit satisfaire à un ensemble de critères Au niveau acoustique, des essais en laboratoire sont décrits. Sommairement, ces essais consistent à faire la mesure des niveaux de bruit de l'alarme avec un microphone placé face à celle-ci à une distance de 1,2 m. Une partition absorbante doit être placée au sol entre le microphone et l'alarme afin d'éliminer le plus possible les réflexions.

À la suite de ces essais, la norme stipule à l'article 6.1 que : *The predominant sound frequency of the alarm shall be defined as the frequency that produces the highest A-weighted sound pressure level. The acceptable frequency range is 700 to 2800 Hz.* Traduit librement, on pourrait lire: « La fréquence prédominante du son de l'alarme est définie comme étant la fréquence qui produit le niveau de pression sonore pondéré-A le plus élevé. Une plage de fréquences acceptables est de 700 à 2800 Hz. »

En examinant le spectre des trois alarmes (voir par exemple la Figure 2) on constate que les alarmes tonale et multi-tonale respectent facilement le critère énoncé précédemment puisque les maxima de niveau de pression se trouvent clairement entre 1000 et 2000 Hz dans les deux cas. La définition un peu imprécise de « fréquence prédominante » proposée dans la norme peut toutefois poser des problèmes d'interprétation dans le cas de l'alarme large-bande où l'énergie sonore est répartie sur une large plage de fréquences. On n'y retrouve alors pas véritablement de « fréquence qui prédomine » dans le sens où on ne voit pas apparaître clairement un ou plusieurs pics dans le spectre⁷. Toutefois, si on applique littéralement les spécifications techniques de la norme, soit : ... *the frequency that produces the highest A-weighted sound pressure level...* on trouve bien un maximum du niveau de pression pour une fréquence située entre 700 et 2800 Hz tel que prescrit par la norme.

5.2 Mesures objectives - champ sonore derrière les véhicules

5.2.1 Série 1 – Ajustement du niveau des alarmes

Le Tableau 1 présente les résultats issus de la procédure d'ajustement des niveaux décrite à la section 4.2.1. Le tableau présente les moyennes et les écarts-type du rapport signal/bruit (exprimés en dB) pris sur les sept microphones. On y présente aussi le niveau (en dB(A)) obtenu à 1 m soit le niveau au microphone de référence.

⁷ La norme SAE J994 a été initialement élaborée à une époque où seules des alarmes tonales étaient utilisées. La définition de « fréquence prédominante » proposée convenait alors probablement et ne posait pas de véritables problèmes d'interprétation.

Tableau 1 : Moyennes et écarts-type du rapport signal/bruit (en dB) et niveaux au microphone de référence (en dB(A))

Position « idéale »						
Type d'alarme	Site 1		Site 2		Site 3	
	Moyenne (écart-type)	Niveau à 1 m	Moyenne (écart-type)	Niveau à 1 m	Moyenne (écart-type)	Niveau à 1 m
Tonale	6,9 (4,2)	107,2	8,0 (5,9)	112,0	3,2 (2,9)	106,0
Multi-tonale	3,9 (2,3)	99,4	5,4 (4,0)	105,2	4,9 (3,1)	102,8
Large-bande	1,9 (1,2)	99,3	3,1 (2,9)	104,9	1,0 (0,7)	102,1
Position « réaliste »						
Type d'alarme	Site 1		Site 2		Site 3	
	Moyenne (écart-type)	Niveau à 1 m	Moyenne (écart-type)	Niveau à 1 m	Moyenne (écart-type)	Niveau à 1 m
Tonale	6,4 (4,7)	109,0	5,4 (3,9)	108,6	3,9 (2,4)	97,1
Multi-tonale	3,5 (2,5)	98,5	3,9 (3,4)	99,7	3,0 (2,8)	104,7
Large-bande	1,7 (1,6)	97,4	2,3 (2,0)	103,8	2,1 (1,3)	101,4

Les résultats montrent qu'à l'exception du site 3 en position « réaliste », on constate des niveaux sonores à 1 m plus élevés avec l'alarme tonale, afin de satisfaire le critère $S/B \geq 0$ dB à tous les microphones. Dans ce dernier cas, le niveau plus faible de l'alarme tonale obtenue à 1 m pourrait être dû à l'emplacement du microphone dans une zone de plus faible pression sonore, étant donné les fortes variations spatiales exprimées dans le Tableau 1 et illustrées à l'Annexe G.

De plus, les moyennes du rapport S/B ainsi que les écarts-types obtenus dans le cas de l'alarme large-bande sont sensiblement plus faibles que dans le cas des alarmes tonale et multi-tonale.

5.2.2 Série 2 - Homogénéité du champ sonore

Les résultats obtenus grâce à la procédure de balayage microphonique décrite à la section 4.2.2 sont montrés à la Figure 5 pour le site 1 et à l'Annexe G pour les sites 2 et 3. Ils sont présentés sous forme de carte du niveau sonore des alarmes derrière le véhicule où les niveaux globaux (L_{eq} en dB(A)) sont représentés par différentes couleurs (carte que l'on peut aussi appeler « patrons d'immission »). Chaque changement de couleur correspond à une variation de 3 dB du niveau global. Une carte a été générée pour chaque combinaison « alarme/site/condition d'installation » pour un total de 18 cartes. Il est aussi possible, à partir de ces cartes, de tracer l'évolution des niveaux de bruit mesurés derrière un véhicule selon des axes bien précis. Un exemple d'un tel tracé est présenté à la Figure 6 pour l'axe situé directement derrière le véhicule (axe 5 sur la Figure 14 à l'Annexe D).

Sans surprise, on observe nettement que l'utilisation d'un signal large-bande permet d'obtenir un champ sonore beaucoup plus homogène derrière le véhicule, tant en s'éloignant qu'en se déplaçant latéralement. Non seulement le champ est plus homogène, mais il décroît de façon régulière derrière le véhicule contrairement au cas de l'alarme tonale où de fortes variations des niveaux de bruit sont observées à cause de phénomènes d'interférence acoustique. Dans certains cas (p.ex. Figure 6 et Figure 18 à l'Annexe G), des variations abruptes pouvant atteindre 15 à 20 dB sont observées sur des distances de moins d'un mètre pour l'alarme tonale. Dans le cas de l'alarme multi-tonale, les variations de niveau de bruit sont beaucoup moins importantes (pouvant atteindre 7-8 dB) et le champ obtenu est beaucoup plus homogène. On constate donc que l'ajout de seulement deux composantes tonales au signal permet d'améliorer sensiblement l'homogénéité du champ sonore.

Notons finalement que les patrons d'immission présentés montrent que les alarmes émettent un peu plus vers le centre que sur les côtés, ce qui est conforme aux patrons de directivité mesurés sur les alarmes et présentés à la Figure 12 (section C.5 de l'Annexe C).

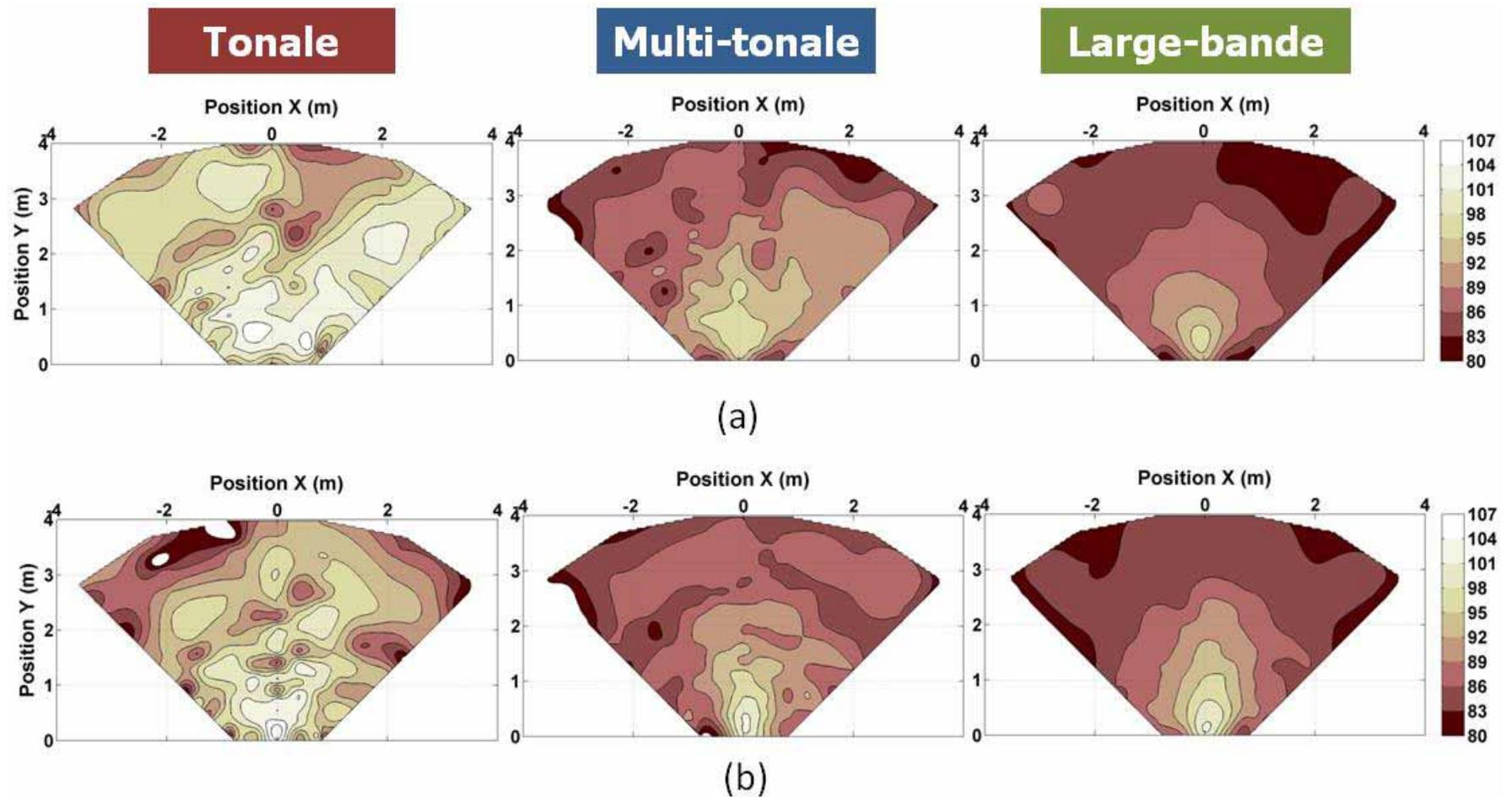


Figure 5 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) derrière le véhicule au Site 1 : (a) alarme en position « réaliste »; (b) alarme en position « idéale ».

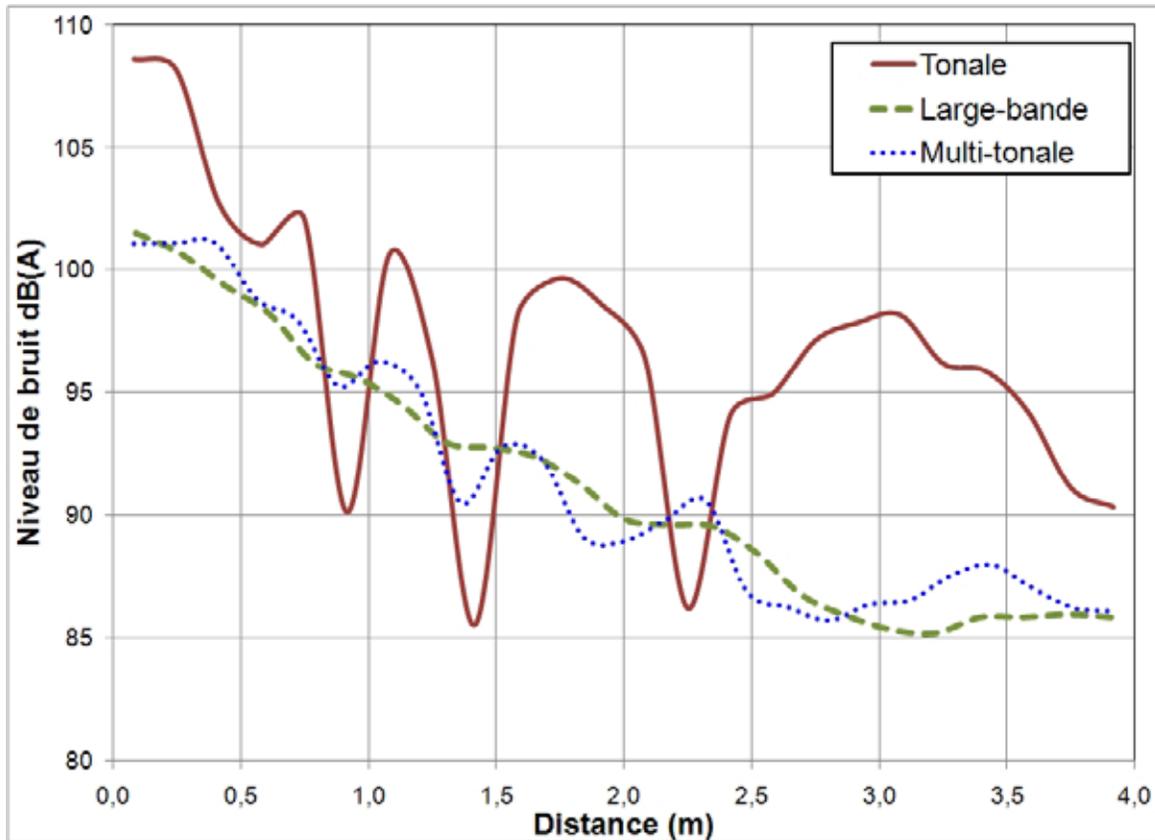


Figure 6 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) selon l'axe 5 de la Figure 14 (site 1, alarme en position dite « idéale »)

5.3 Mesures subjectives - épreuves psychoacoustiques

5.3.1 Seuils de détection

Les seuils de détection mesurés en dBA sont exprimés en rapport signal-sur-bruit (dB S/B). La conversion des données a été effectuée en soustrayant le niveau du bruit (soit 81 dBA, 83 dBA, 86 dBA ou 89 dBA pour les bruits 1 à 4, respectivement) de chaque seuil mesuré en dBA⁸. Puisque les mesures du seuil étaient répétées, les seuils individuels ont été calculés à partir de la moyenne arithmétique des deux seuils pour une condition d'écoute donnée chez chaque sujet.

La Figure 7 résume les seuils moyens associés aux trois alarmes, avec et sans protection, dans les quatre bruits. La portion du haut montre les seuils obtenus pour les participants du groupe portant des coquilles tandis que celle du bas présente les seuils pour les participants du groupe équipé de bouchons.

⁸ Il est important de noter que pour toutes les épreuves psychoacoustiques, le niveau sonore rapporté des alarmes correspond à la portion active (« on ») du signal, soit 3 dB de plus que le niveau sonore moyen sur plusieurs cycles mesuré au sonomètre.

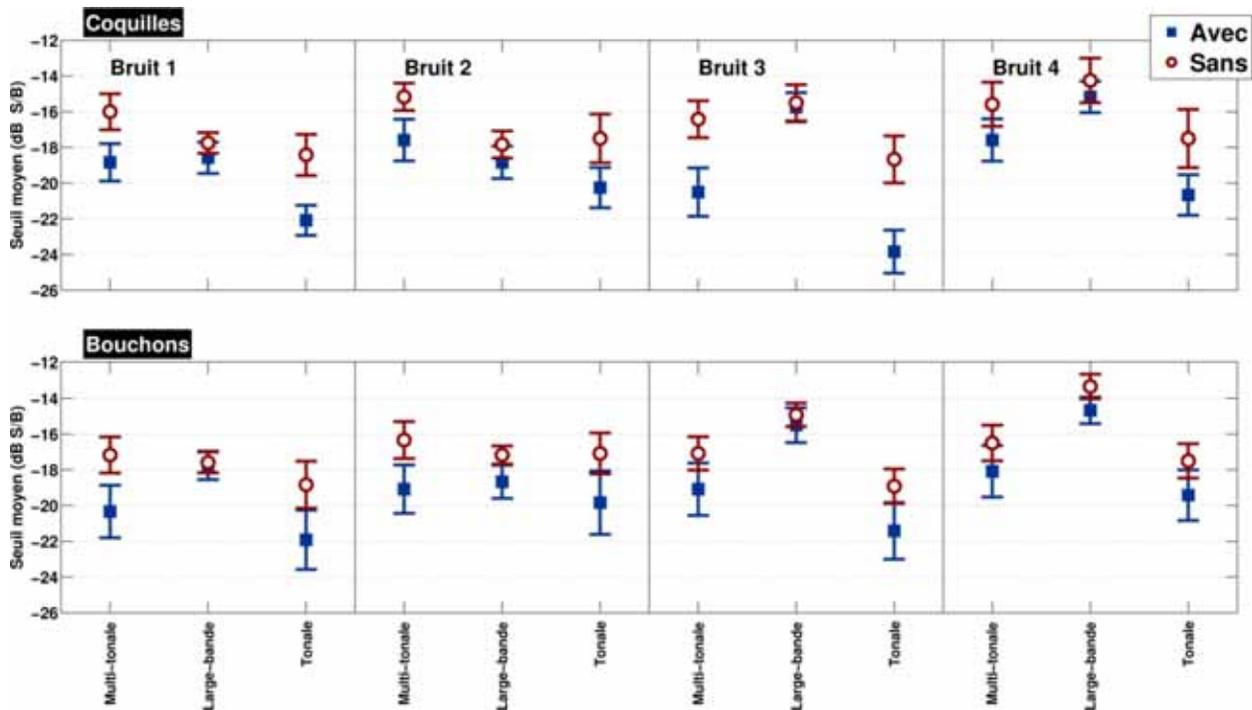


Figure 7 : Seuils de détection moyens des alarmes de recul dans quatre environnements bruyants, avec et sans protection auditive. Les barres d'erreur représentent +/- erreur type de la moyenne.

On note dans plusieurs cas à la Figure 7 un chevauchement dans les barres d'erreur pour les données avec et sans protection auditive, suggérant des seuils de détection similaires dans les deux conditions d'écoute, particulièrement dans le cas de port des bouchons. Pour les coquilles, la figure semble indiquer plus fréquemment des différences entre les seuils de détection obtenus sans et avec protection. Les facteurs alarmes et bruit semblent également influencer les seuils de détection. Par ailleurs, les données semblent suivre des tendances similaires dans les deux groupes de participants (coquilles et bouchons). Pour vérifier ces constats, ainsi que la présence d'effets principaux et d'interactions entre les divers facteurs à l'étude, des analyses statistiques ont été menées.

L'analyse statistique complète des résultats se trouve à l'Annexe H.1 et révèle des effets principaux significatifs pour les trois facteurs intrasujets (alarmes, bruit et port de protecteurs) et des interactions significatives entre les facteurs alarmes et bruit, alarmes et port de protecteurs, ainsi qu'entre les trois facteurs intrasujets. En contrepartie, le type de protecteur (facteur intersujets) ne semble pas avoir d'effet significatif sur les seuils de détection.

5.3.2 Égalisation de la sonie

Les participants devaient ajuster séparément le niveau de présentation des alarmes multi-tonale et large-bande afin que la perception de leur force sonore (sonie) soit équivalente à celle de l'alarme de référence tonale présentée à un rapport S/B de 0 dB dans chacun des quatre bruits sélectionnés (soit à 81 dBA dans le bruit 1, 83 dBA dans le bruit 2, 86 dBA dans le bruit 3 et

89 dBA dans le bruit 4). Les données sont rapportées en termes de différences entre le niveau sonore de l'alarme sous observation et celui de l'alarme tonale. Une différence positive (négative) indique que l'alarme a été ajustée à un niveau sonore plus (moins) élevé que l'alarme tonale pour atteindre une même sonie.

La Figure 8 résume les résultats associés aux deux alarmes en comparaison avec l'alarme tonale, avec et sans protection, dans les quatre bruits de l'étude. La portion de gauche montre les résultats pour les participants du groupe des coquilles tandis que celle de droite présente les résultats pour les participants du groupe des bouchons.

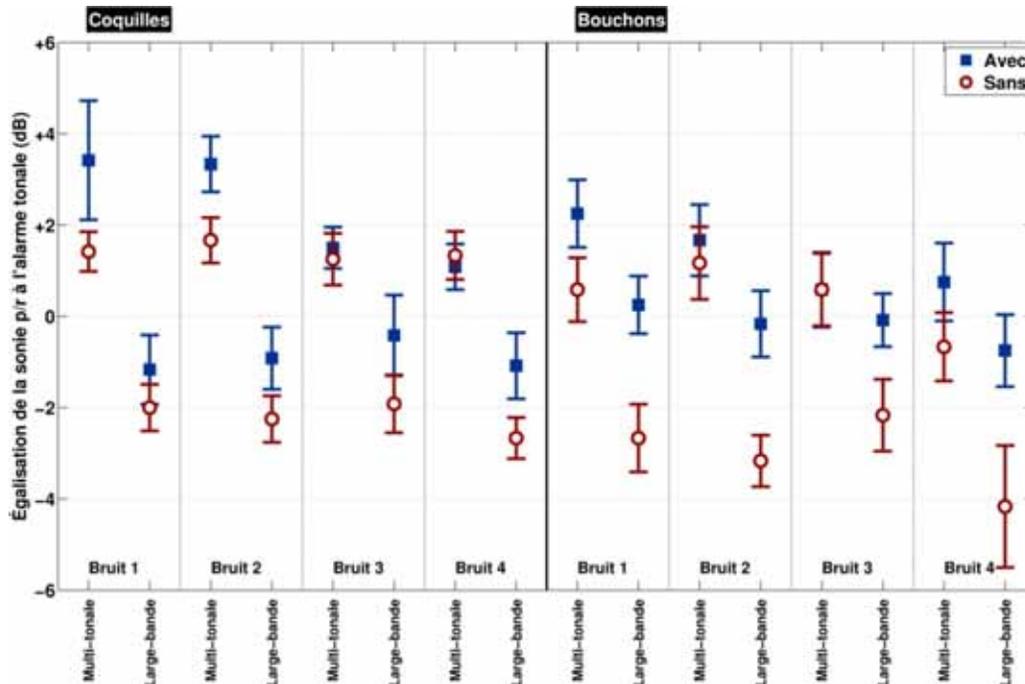


Figure 8 : Égalisation de la sonie par rapport à l'alarme tonale dans quatre environnements bruyants, avec et sans protection auditive. Les barres d'erreur représentent +/-1 erreur type de la moyenne.

Quoique l'on note dans plusieurs cas un chevauchement dans les barres d'erreur pour les données avec et sans protection auditive, suggérant des résultats similaires dans les deux conditions d'écoute, plusieurs données avec et sans protection sont clairement distinctes, surtout pour l'alarme large-bande dans le groupe de participants avec bouchons. Le facteur alarme semble particulièrement influencer les résultats. Pour vérifier ces constats, ainsi que la présence d'effets principaux et d'interactions entre les divers facteurs à l'étude, des analyses statistiques ont été menées.

L'analyse statistique complète des résultats se trouve à l'Annexe H.2 et révèle des effets principaux significatifs pour les trois facteurs intrasujets (alarmes, bruit et port de protecteurs) et des interactions significatives entre les facteurs alarmes et bruit, et entre les facteurs alarmes et port de protecteurs. En contrepartie, le type de protecteur (facteur inter-sujets) ne semble pas avoir d'effet significatif sur les résultats.

5.3.3 Évaluation du degré d'urgence

La Figure 9 résume le degré moyen d'urgence ressenti par l'ensemble des 24 participants sur une échelle de 0 à 100 en réponse aux trois alarmes présentées à trois rapports S/B, avec et sans protection, dans les quatre bruits. La portion du haut montre le degré moyen d'urgence pour les participants du groupe des coquilles tandis que celle du bas présente le degré moyen d'urgence pour les participants du groupe des bouchons.

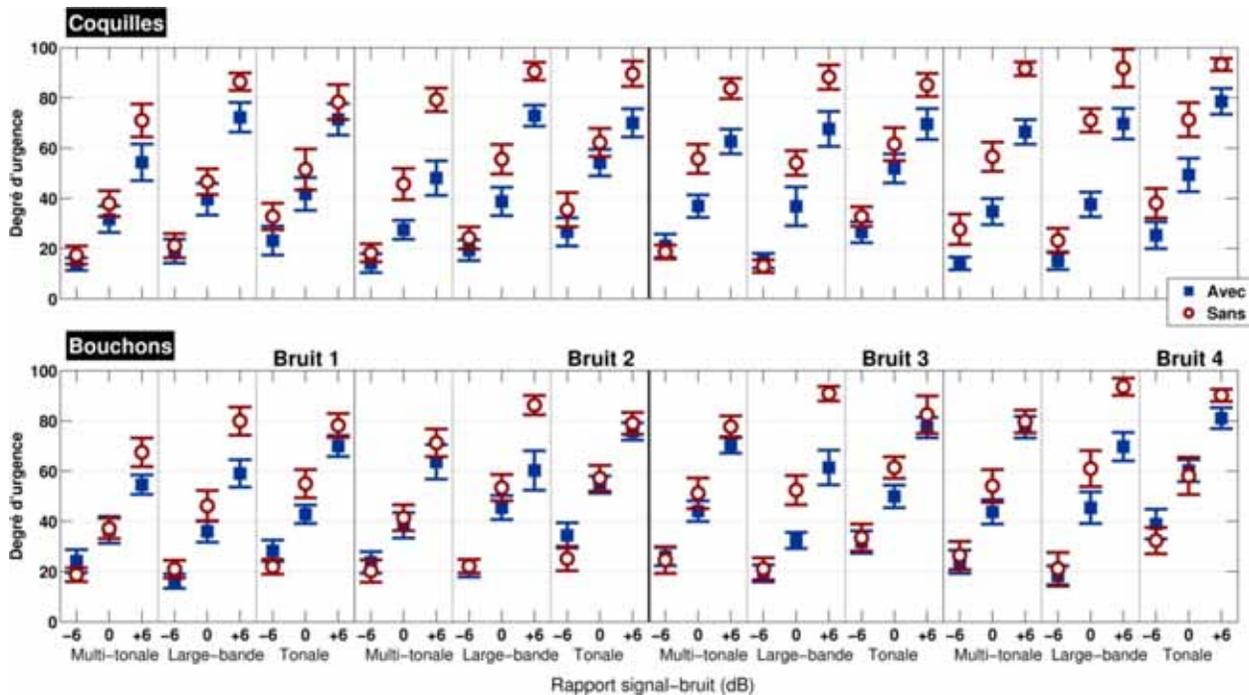


Figure 9 : Degré d'urgence (échelle 0-100) dans quatre environnements bruyants avec trois rapports signal-bruit différents, avec et sans protection auditive. Les barres d'erreur représentent +/-1 erreur type de la moyenne.

Le port de protection auditive semble avoir un effet significatif sur l'évaluation du degré d'urgence puisqu'on note, dans plusieurs cas, des résultats distinctifs avec et sans protection, c'est-à-dire une absence de chevauchement dans les barres d'erreur, tant pour le groupe des coquilles que celui des bouchons. Il est également clair que, peu importe l'alarme et le bruit utilisés, le rapport S/B a un effet déterminant sur l'évaluation du degré d'urgence. En effet, on note que le degré d'urgence perçu augmente avec le niveau de présentation des alarmes dans toutes les conditions évaluées. Les facteurs alarmes et bruit semblent également influencer le degré d'urgence perçu. Pour vérifier ces constats, ainsi que la présence d'effets principaux et d'interactions entre les divers facteurs à l'étude, des analyses statistiques ont été menées.

L'analyse statistique complète des résultats se trouve à l'Annexe H.3. Une analyse a été menée séparément pour les coquilles et pour les bouchons. Dans le cas des coquilles, on note des effets principaux significatifs pour les quatre facteurs intrasujets (alarme, bruit, port de protecteurs et niveau de présentation), des interactions d'ordre 2 entre les facteurs alarme et bruit, entre les

facteurs alarme et niveau de présentation et entre les facteurs port de protecteurs et niveau de présentation, ainsi qu'une interaction significative d'ordre 3 entre les facteurs alarme, port de protecteurs et niveau de présentation. Dans le cas des bouchons, on note un nombre moins important d'effets et d'interactions significatifs. On note des effets principaux significatifs pour les facteurs bruit, port de protecteurs et niveau de présentation, ainsi qu'une interaction significative d'ordre 2 entre les facteurs alarmes et port de protecteurs.

5.3.4 Localisation auditive

Deux variables dépendantes ont été mesurées lors des tâches de localisation auditive, soit l'erreur angulaire et le pourcentage de confusions (confusions de type gauche/droite pour la condition des haut-parleurs derrière et de type avant/arrière pour les conditions avec les haut-parleurs à la droite et à la gauche). Pour quantifier l'erreur angulaire, une confusion entre deux haut-parleurs adjacents consiste en une erreur de 15°, indépendamment de la direction de l'erreur, alors qu'une confusion entre deux positions séparées par deux haut-parleurs correspond à une erreur de 30°, et ainsi de suite. L'erreur angulaire individuelle représente alors la moyenne arithmétique, en degrés, des erreurs commises sur l'ensemble des 24 présentations.

Une confusion gauche/droite ou avant/arrière existe lorsque le participant identifie la source sonore comme provenant d'un quadrant opposé au stimulus. Tel qu'illustré à l'annexe F.2, le dispositif expérimental comprend deux quadrants de 90° définis par les haut-parleurs 1 à 6 et par les haut-parleurs 7 à 12. Il est important de noter qu'une confusion entre les haut-parleurs 6 et 7 est considérée comme une confusion de type gauche/droite lorsque les haut-parleurs sont derrière mais n'est pas considérée comme une confusion de type avant/arrière pour les conditions avec les haut-parleurs de côté. En effet, les données d'étude précédentes (Vaillancourt et coll., 2011) pour ces deux conditions de côté ont démontré que l'erreur angulaire moyenne (11°) chez des auditeurs normaux était presque équivalente à la séparation de 15° retrouvée entre deux haut-parleurs adjacents. Le nombre de confusions avant/arrière ne prend donc pas en considération les confusions entre les haut-parleurs 6 et 7 puisqu'il pourrait être argumenté qu'une telle confusion pourrait être le résultat d'une difficulté à distinguer des haut-parleurs adjacents plutôt qu'une confusion avant/arrière comme telle. Pour la condition avec les haut-parleurs derrière, l'erreur angulaire moyenne obtenue chez des auditeurs normaux n'est que de 6° (Vaillancourt et coll., 2011), ce qui est clairement inférieur à la séparation de 15° entre les haut-parleurs 6 et 7. Ainsi une confusion entre ces deux derniers peut être considérée comme une erreur de type gauche/droite. Dans chaque condition d'écoute, le pourcentage individuel de confusion a été calculé en divisant le nombre de confusions effectuées par 24 (nombre de présentations) et en multipliant par la suite le tout par 100.

La Figure 10 résume les résultats des mesures de localisation auditive associés aux trois alarmes, avec et sans protection, dans les trois conditions d'arrangement des haut-parleurs. La portion du haut montre l'erreur angulaire moyenne (en degrés) obtenue pour le groupe des coquilles et celui des bouchons, tandis que celle du bas présente le pourcentage de confusion moyen pour ces deux groupes de participants (coquilles vs bouchons).

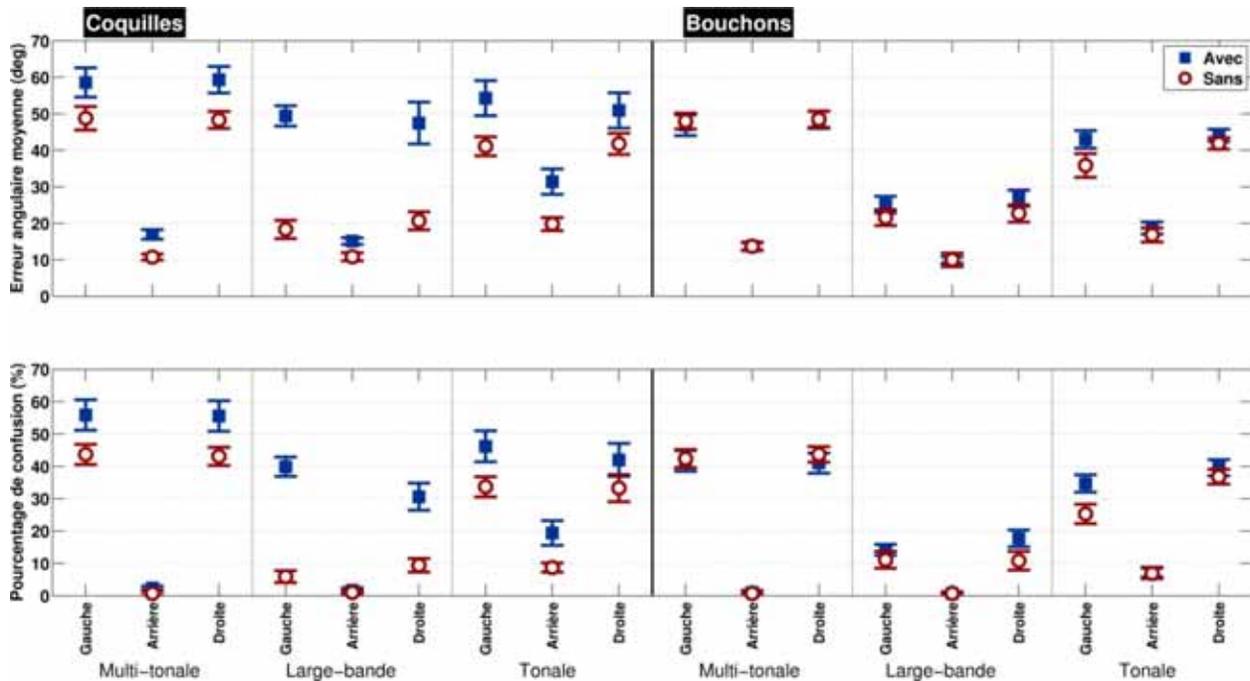


Figure 10 : Erreur angulaire moyenne (haut) et pourcentage de confusion (bas), avec et sans protection auditive. Les barres d'erreur représentent +/- erreur type de la moyenne.

Dans cette figure, les barres d'erreur pour les données avec et sans protection auditive se chevauchent très peu souvent pour le groupe des coquilles, suggérant des performances différentes avec et sans protection avec ce protecteur. Pour le groupe des bouchons, les performances avec et sans protection semblent plus similaires. Les résultats sans protection auditive semblent similaires entre les deux groupes de participants, un résultat qui était attendu. Par contre, lors du port des protecteurs auditifs, les performances pour le groupe des bouchons semblent meilleures que celles du groupe des coquilles. Le type d'alarme et la condition d'arrangement des haut-parleurs semblent également avoir un effet sur l'erreur angulaire et le pourcentage de confusion. Pour vérifier ces constats, ainsi que la présence d'effets principaux et d'interactions entre les divers facteurs à l'étude, des analyses statistiques ont été menées.

L'analyse statistique complète des résultats se trouve à l'Annexe H.4. Un effet significatif du type de protecteur (facteur inter-sujets) a été noté et des analyses statistiques ont dû être effectuées séparément pour les deux groupes. Dans le cas des coquilles, on note des effets principaux significatifs pour les trois facteurs intrasujets (alarmes, arrangement des haut-parleurs et port de protecteurs) et des interactions significatives entre les facteurs alarmes et arrangement des haut-parleurs, alarmes et port de protecteurs, arrangement des haut-parleurs et port de protecteurs, ainsi qu'entre les trois facteurs intrasujets. Dans le cas des bouchons, on note également des effets principaux significatifs pour les facteurs alarmes et arrangement des haut-parleurs, mais il ne semble pas y avoir d'effet significatif du port de protecteurs auditifs, les erreurs angulaires et pourcentages de confusion étant similaires avec et sans les bouchons. De plus, dans le groupe des bouchons, la seule interaction significative notée est entre les facteurs alarme et arrangement des haut-parleurs.

6. DISCUSSION

6.1 Conformité avec la norme SAE J994

La norme SAE J994 est la plus souvent citée en Amérique du Nord dans les règlements de santé et de sécurité au travail touchant les alarmes de recul. Tel que noté précédemment, cette norme a été mise au point au moment où seules les alarmes tonales étaient disponibles sur le marché. Avec l'avènement de la technologie large-bande, il importe de vérifier que cette dernière respecte la norme. En appliquant à la lettre ce qui est proposé à l'article 6.1 de la norme SAE J994, on peut affirmer que l'alarme large-bande remplit les conditions demandées. Toutefois, les notions de « fréquence prédominante » (*predominant sound frequency*) et du niveau sonore de l'alarme, telles que définies dans la norme, sont floues et imprécises lorsqu'elles sont appliquées aux alarmes large-bande et peuvent porter à interprétation. L'ensemble de la section 6 de la norme qui précise les spécifications fonctionnelles des alarmes demanderait à être revu pour permettre l'évaluation d'une gamme plus étendue d'alarmes de recul commerciales, notamment afin d'inclure les différents paramètres d'analyse des signaux (p. ex., préciser la largeur des filtres d'analyse et l'application de fenêtres de pondération, définir le calcul des niveaux sonores, etc.).

6.2 Mesures objectives- Champ sonore derrière les véhicules

Pour respecter la recommandation d'un rapport S/B ≥ 0 dB de la norme ISO 9533 aux sept microphones, il appert que les niveaux sonores de l'alarme tonale à 1 m des véhicules doivent être supérieurs de 4 à 8 dB en situation idéale et de 5 à 10 dB en situation réaliste aux niveaux sonores obtenus avec l'alarme large-bande. Cette observation peut s'expliquer par les fortes variations sonores d'un microphone à l'autre pour l'alarme tonale (voir Tableau 1), d'où la nécessité d'augmenter la puissance de l'alarme pour obtenir un rapport S/B d'au moins 0 dB à tous les microphones.

L'analyse des cartes du niveau sonore des alarmes derrière les véhicules met particulièrement en évidence ces fortes variations acoustiques (voir Figure 5, Figure 6 et l'Annexe G) pour l'alarme tonale, qui peuvent atteindre 15 à 20 dB sur des distances inférieures à 1 m. Des variations pouvant atteindre 7-8 dB ont été obtenues avec l'alarme multi-tonale alors que le champ sonore derrière les véhicules est homogène pour l'alarme large-bande, tout en suivant une décroissance naturelle en fonction de la distance. Des résultats semblables ont été rapportés dans la littérature pour l'alarme tonale (Laroche et coll., 1995). Ces constats peuvent avoir des conséquences sur la sécurité des travailleurs ainsi que sur la nuisance environnementale.

En ce qui concerne la sécurité, un travailleur s'attend à une augmentation du niveau de l'alarme lorsqu'un véhicule en marche arrière s'approche de lui. Ce phénomène pourrait cependant s'inverser en raison des fluctuations abruptes du niveau de l'alarme tonale. Par exemple, un travailleur pourrait interpréter une chute du niveau sonore de l'alarme comme une réduction du risque de danger, en pensant que le véhicule s'éloigne ou en sous-estimant la distance réelle qui le sépare du véhicule. Il est par ailleurs possible qu'à certains moments, le niveau chute à tel point que le travailleur ne soit plus en mesure de détecter l'alarme ou de la juger suffisamment urgente, surtout s'il accomplit une autre tâche (voir l'exemple d'un accident mortel dans

Laroche, 2006). De plus, des niveaux sonores particulièrement élevés de l'alarme tonale à certains foyers peuvent engendrer des comportements non désirables, tels que le débranchement ou la modification des alarmes, qui pourraient compromettre davantage la sécurité.

La nécessité d'augmenter la puissance sonore de l'alarme tonale par rapport à l'alarme multi-tonale, et plus particulièrement à l'alarme large-bande, peut également avoir comme conséquence d'augmenter la nuisance pour les riverains et les travailleurs qui se trouvent hors de la zone de danger. Ce dernier aspect contribue au phénomène d'habituation.

Tel qu'anticipé, les mesures objectives démontrent que l'alarme large-bande présente des avantages par rapport aux alarmes tonales et multi-tonales, en raison d'une meilleure homogénéité de la propagation sonore derrière les véhicules lourds.

6.3 Mesures subjectives- Épreuves psychoacoustiques

6.3.1 Détection

Pour l'épreuve de détection, les seuils moyens variaient entre -13 et -24 dB S/B sur l'ensemble des conditions. En d'autres mots, ceci signifie qu'une alarme pourrait demeurer tout juste audible lorsqu'elle est ajustée à des niveaux nettement plus faibles que le bruit ambiant. Ainsi, les alarmes de recul devraient être clairement audibles si elles sont ajustées selon les recommandations de la norme ISO 9533 ($S/B \geq 0$ dB). En effet, des critères généraux proposés pour l'ajustement optimal des avertisseurs sonores (Tran Quoc et Hétu, 1996; Zheng et coll., 2007) stipulent que ces derniers devraient être 12 à 25 dB au-delà du seuil de détection dans le bruit. Des niveaux plus faibles risqueraient de ne pas solliciter l'attention alors que des niveaux plus élevés risqueraient de créer des réactions de sursaut.

La norme ISO 7731 est aussi souvent utilisée pour l'ajustement des avertisseurs sonores, incluant les alarmes de recul. La méthode A proposée dans celle-ci, soit d'ajuster le niveau sonore global d'un avertisseur 15 dB au-dessus du niveau de bruit ambiant dans la zone de réception, signifie un ajustement qui pourrait atteindre, compte tenu de nos résultats, 39 dB au-dessus du seuil de détection. Ainsi, la méthode A produit un ajustement qui s'avère excessif dans le cas des alarmes de recul. L'utilisation des méthodes B et C de la norme ISO 7731 est alors encouragée malgré l'analyse acoustique plus détaillée par bandes de fréquence, si des vérifications supplémentaires sont envisagées en conjonction avec ISO 9533.

Notons au Tableau 1 que les niveaux sonores des alarmes ont dû être ajustés entre 97 et 109 dBA à 1 m lors de notre expérimentation pour rencontrer les exigences de la norme ISO 9533. Ceci correspond aux alarmes de type B et C de la norme SAE J994, majoritairement utilisées dans les milieux de travail bruyants. Toutefois, dans la norme ISO 9533, le niveau sonore de l'alarme est évalué lors d'un seul scénario possible de bruit ambiant, soit celui du véhicule qui fonctionne à haut régime. En pratique, le véhicule peut fonctionner à différents régimes et il y a souvent d'autres sources de bruit ambiant plus ou moins intenses à proximité des travailleurs. La norme ne tient pas compte de ces différents scénarios qui nécessiteront des niveaux sonores d'alarmes plus ou moins intenses que ceux spécifiés dans ISO 9533. Ceci militerait en faveur de l'utilisation d'alarmes ajustables en fonction du niveau de bruit ambiant, dont les caractéristiques d'adaptation seraient stipulées dans une norme.

En ce qui concerne le choix du type d'alarme comme tel, les données de détection de l'étude actuelle démontrent que l'alarme tonale pourrait présenter un certain avantage par rapport à l'alarme large-bande se traduisant par une amélioration de 5 à 7 dB des seuils dans les bruits riches en hautes fréquences (bruits 3 et 4) avec protection auditive. Pour les autres conditions de bruit et de protection auditive, l'avantage de l'alarme tonale se chiffrait à un maximum de 3-4 dB. Notons que l'alarme multi-tonale présentait des résultats se situant entre l'alarme tonale et l'alarme large-bande et que le type de protecteurs (bouchons vs coquilles) n'avait pas d'effet significatif sur les seuils de détection.

D'un point de vue pratique, il faut interpréter l'avantage en détection de l'alarme tonale noté ci-dessus en tenant compte des variations beaucoup plus importantes de l'ordre de 15-20 dB des niveaux sonores observées à l'arrière des véhicules pour ce type d'alarme. Ainsi, ce gain observé en laboratoire ne présenterait pas un avantage réel par rapport à l'alarme large-bande pour assurer la détection des alarmes par les travailleurs dans des conditions terrain, compte tenu de la bien meilleure homogénéité du champ sonore que procure cette dernière.

6.3.2 Sonie et urgence

En ce qui concerne la perception de la force sonore des alarmes dans le bruit, l'alarme large-bande peut être ajustée à un niveau de 2 à 4 dB plus faible sans protecteurs et à un niveau d'au plus 1 dB plus faible avec protecteurs pour que sa sonie soit comparable à celle de l'alarme tonale. En d'autres mots, l'alarme large-bande sonnerait plus fort que l'alarme tonale lorsqu'elles sont toutes les deux ajustées au même niveau sonore, tandis que l'alarme multi-tonale sonnerait moins fort (voir Figure 8). Ces résultats sont comparables aux différences observées dans la littérature pour l'égalisation de sonie des sons purs par rapport aux bruits en bande large (Scharf et Fishken, 1970). Ainsi, même si l'alarme large-bande est détectée dans le bruit à des niveaux sonores plus élevés que ceux de l'alarme tonale, sa sonie croît plus rapidement en fonction du niveau sonore, en raison de son contenu fréquentiel étendu.

En ce qui a trait à la perception du degré d'urgence, le facteur le plus important est le niveau de présentation des alarmes (voir Figure 26 à l'Annexe H). Sur la base des résultats rapportés aux Tableau 7 et Tableau 8 de l'Annexe G, il est possible de calculer une pente qui caractérise l'augmentation du degré d'urgence (échelle de 0 à 100 unités) en fonction du niveau de présentation (rapport S/B en dB). La pente est de l'ordre de 5 unités/dB sans protection et d'environ 4 unités/dB avec protection. Dans des conditions expérimentales équivalentes, l'alarme tonale génère davantage un sentiment d'urgence que l'alarme multi-tonale, avec des différences allant de 1 à 27 unités dans le degré moyen d'urgence perçu. L'alarme tonale est également jugée plus urgente que l'alarme large-bande dans 19 des 24 comparaisons possibles entre ces deux types d'alarme (dont deux sont significatives dans le bruit 3 à faible niveau), avec des différences variant entre 0 et 20 unités. La plupart de ces différences ne sont toutefois pas statistiquement significatives en raison de la trop grande variabilité des résultats. Quant à la signification concrète de telles différences, les pentes estimées précédemment permettent de calculer l'ajustement nécessaire du niveau sonore d'une alarme pour contrer un écart du degré d'urgence. Ainsi, le bénéfice maximal de 20 unités d'urgence de l'alarme tonale par rapport à l'alarme large-bande dans cette étude équivaut à un avantage d'environ 4 dB dans le niveau de présentation de l'alarme tonale. Autrement dit, le niveau de l'alarme tonale pourrait être réduit jusqu'à un maximum de 4 dB pour véhiculer le même degré d'urgence que l'alarme large-bande.

Tout comme pour la détection des alarmes, il faut interpréter l'avantage en urgence de l'alarme tonale noté ci-dessus en tenant compte des variations spatiales du niveau sonore de cette alarme à l'arrière des véhicules, lesquelles sont de l'ordre de 15-20 dB. Ainsi, le gain maximal de 4 dB de l'alarme tonale pour véhiculer l'urgence en situation de laboratoire ne pourrait contrer les variations nettement plus importantes du niveau sonore sur le terrain et ne présenterait pas un avantage réel en pratique.

Enfin, il faut prendre note que les résultats de l'étude ci-dessus portent uniquement sur les caractéristiques acoustiques influençant le degré d'urgence produit par les alarmes. Même si les participants étaient en laboratoire sans situation de danger lors de leurs jugements, ils étaient bien informés du contexte de l'étude sur les alarmes de recul. Il n'y avait donc pas de confusion quant à l'interprétation des signaux, tout particulièrement en ce qui concerne l'alarme large-bande avec laquelle nous sommes moins familiers. En ce sens, l'étude ne répond pas directement à la question de l'urgence effective provoquée par la nouvelle alarme en bande-large en situation de danger sur le terrain, là où le travailleur doit non seulement percevoir le signal, mais aussi décoder rapidement sa signification bien particulière. Ainsi, lorsque les participants ont été questionnés sur les facteurs influençant leur jugement au regard du degré d'urgence, plusieurs d'entre eux ont rapporté un sentiment d'urgence plus élevé avec l'alarme tonale qu'avec l'alarme large-bande en raison de sa plus grande familiarité en tant que signal de danger. Sur la base des résultats d'études portant sur l'urgence des signaux avertisseurs, on peut supposer qu'une familiarisation avec l'alarme large-bande pourrait avoir un impact sur le degré d'urgence perçu (Guillaume et coll., 2003; Burt et coll., 1995; Petocz et coll., 2008)).

Finalement, notons que l'alarme large-bande est plus facile à localiser que l'alarme tonale, particulièrement dans la dimension avant/arrière, ce qui pourrait faciliter l'apprentissage d'une association entre l'alarme et la source de danger chez les travailleurs.

6.3.3 Localisation

Sur l'ensemble des données, on note des performances supérieures lorsque l'alarme large-bande est utilisée comparativement aux deux autres types d'alarmes. Le facteur alarme interagit avec plusieurs autres facteurs et ressort davantage dans certaines conditions.

La localisation des alarmes est nettement meilleure dans la dimension gauche/droite (haut-parleurs derrière) que dans la dimension avant/arrière (haut-parleurs sur le côté), un résultat qui concorde avec la littérature (Vaillancourt et coll., 2011). En situation gauche/droite, le nombre de confusions et l'erreur angulaire sont généralement faibles, le pire cas étant la condition avec l'alarme tonale avec coquilles (de l'ordre de 20 % de confusions et de 30° en erreur angulaire).

Tel qu'anticipé, c'est dans la dimension avant/arrière que les plus grands écarts sont notés entre les divers types d'alarme. Dans le cas des alarmes tonale et multi-tonale, les participants confondaient l'avant et l'arrière environ une fois sur trois (33 %) à une fois sur deux (50 %), ce qui correspond essentiellement, dans ce dernier cas, à la performance obtenue en répondant de façon aléatoire (par chance). Pour l'alarme large-bande, les confusions sont beaucoup moins fréquentes sans protection (environ 10 %) et avec bouchons (environ 18 %). Par contre, avec les coquilles, le pourcentage de confusion augmente de façon importante et peut atteindre 40 %. Une tendance similaire est notée pour l'erreur angulaire. Ces résultats mettent en évidence l'effet

perturbateur des coquilles sur la localisation sonore comparativement à la condition sans protection auditive ou avec bouchons. Encore une fois, les données supportent les constats généraux rapportés dans la littérature en localisation auditive à l'effet de meilleurs résultats avec des signaux à spectre débordant vers les hautes fréquences dans la dimension avant/arrière (Butler, 1986; Makous et Middlebrooks, 1990).

Il est important de noter que les épreuves de localisation ont été menées en demandant aux participants de ne pas bouger la tête, ce qui correspond à la situation la plus difficile de localisation. Cette approche a permis d'éviter les effets de plafond qui auraient rendu difficile la comparaison des alarmes entre elles. D'un point de vue pratique, les mouvements de tête favorisent la résolution des confusions avant/arrière (Moore, 1982). D'autres facteurs, tels que les réflexions et diffractions acoustiques, les variations temporelles, fréquentielles et spatiales du bruit ambiant, le statut auditif des travailleurs, ainsi que le temps de réaction disponible pour utiliser les mouvements de tête, ne peuvent être négligés dans l'évaluation des aspects reliés à la sécurité. Des études futures permettront de quantifier l'importance de ce facteur non négligeable pour assurer la sécurité des travailleurs se retrouvant à proximité des véhicules lourds.

7. CONCLUSION

Malgré que la norme SAE J994 mérite d'être révisée, l'alarme large-bande semble néanmoins s'y conformer. Les mesures objectives du niveau de pression sonore généré par les alarmes ont démontré que le champ sonore mesuré derrière les véhicules est nettement plus uniforme pour l'alarme large-bande que pour les deux autres types d'alarmes. En effet, pour l'alarme tonale, on note des variations abruptes du niveau sonore de l'ordre de 15-20 dB sur de courtes distances (moins de 1 m). Ainsi, la perception sonore de l'alarme large-bande serait également plus homogène que celle de l'alarme tonale à l'arrière d'un véhicule lourd. Les niveaux de pression sonore mesurés derrière les véhicules ont également permis de constater que le critère d'un rapport S/B ≥ 0 dB spécifié dans la norme ISO 9533 semble adéquat pour un véhicule qui fonctionne à haut régime, soit le scénario proposé par la norme. Toutefois, d'un point de vue pratique, plusieurs autres scénarios sont possibles sur le terrain et l'alarme pourrait alors s'avérer trop forte ou trop faible dans plusieurs cas. Ainsi, les alarmes ajustables en fonction du niveau de bruit ambiant seraient une alternative intéressante à envisager.

Pour leur part, les épreuves psychoacoustiques en laboratoire ont démontré que l'alarme tonale était plus facile à détecter dans le bruit que l'alarme large-bande, un gain pouvant atteindre jusqu'à 5-7 dB lors du port de protection auditive dans des bruits riches en hautes fréquences. Aussi, l'alarme tonale véhicule un degré d'urgence dans le bruit légèrement supérieur à celui causé par l'alarme large-bande chez des individus qui sont peu familiers avec ce dernier type d'alarme, un bénéfice qui équivaut à un gain maximal de 4 dB dans certaines conditions, particulièrement à de faibles niveaux de présentation sans protection auditive. Toutefois, ces avantages de l'alarme tonale en situation de laboratoire ne permettent pas de contrer l'effet néfaste des variations spatiales du niveau sonore de cette alarme derrière le véhicule (15-20 dB), lesquelles sont nettement plus prononcées qu'avec l'alarme large-bande.

Ainsi, malgré les résultats de laboratoire, l'alarme large-bande pourrait être supérieure à l'alarme tonale du point de vue de la détection et de la perception d'urgence sur le terrain en raison de l'homogénéité du patron de propagation sonore de l'alarme large-bande derrière le véhicule, sans évidence de chutes focalisées dans le niveau sonore risquant de compromettre la sécurité du travailleur. Dans un même ordre d'idées, l'avantage d'environ 2-4 dB de l'alarme large-bande sur l'alarme tonale en sonie observé en laboratoire devrait persister sur le terrain. De plus, la localisation sonore dans la dimension avant/arrière est nettement meilleure avec l'alarme large-bande qu'avec les deux autres types de signaux. Ce constat revêt une grande importance puisque les confusions de type avant/arrière peuvent être néfastes du point de vue de la sécurité en guidant le mouvement ou l'attention du travailleur dans la mauvaise direction. Il est toutefois important de noter que la protection auditive peut augmenter davantage le nombre de confusions avant/arrière, particulièrement lors de l'utilisation de casques passifs (coquilles). Enfin, les résultats de l'étude n'ont pas démontré un avantage particulier de l'alarme comparativement aux alarmes tonale et large-bande lors des épreuves psychoacoustiques. Il faut noter ici que les conclusions tirées des résultats ne peuvent être étendues automatiquement au cas d'environnements relativement réverbérants (p.ex. intérieurs d'usines, entrepôts) à cause des nombreuses réflexions sur les différentes parois qui viendraient fort possiblement modifier l'homogénéité du champ sonore et les capacités de localisation.

Dans l'ensemble, les résultats n'ont pas identifié de contre-indication à utiliser l'alarme de recul large bande. Afin d'assurer une utilisation optimale de ces alarmes et clarifier la réglementation, certaines recommandations sont de mises:

- 1) Réviser la norme SAE J994 pour mieux inclure les alarmes large-bande;
- 2) Utiliser des alarmes ajustables en fonction du bruit ambiant et réviser les algorithmes d'ajustement afin d'assurer une audibilité adéquate dans divers scénarios possibles de bruit ambiant;
- 3) Optimiser l'emplacement des alarmes sur les véhicules lourds afin d'assurer une propagation sonore la plus homogène possible;
- 4) Privilégier l'utilisation des bouchons préférablement aux coquilles pour favoriser la localisation auditive;
- 5) Familiariser les travailleurs avec l'alarme large-bande avant son utilisation dans les milieux de travail. Cette familiarisation pourrait potentiellement accroître le sentiment d'urgence associé à ce type de signal de danger sur le terrain.

Afin de fournir des recommandations plus spécifiques et détaillées en matière d'utilisation des alarmes de recul large-bande, des études additionnelles sont requises. Il importe par ailleurs de documenter la perception et la localisation des alarmes de type large-bande chez les individus avec perte auditive dans diverses conditions de protection auditive. De plus, il serait important de quantifier l'effet des mouvements de la tête sur la capacité de détecter et de localiser l'alarme large-bande en conditions réalistes de travail (avec et sans protection auditive), ainsi que l'effet de familiarité sur le niveau d'urgence. Par ailleurs, l'utilisation de casques actifs (amplification à niveaux faibles et atténuation graduelle en fonction du niveau sonore) devrait être évaluée afin de déterminer les avantages potentiels de ce type de protecteurs dans les différentes épreuves psychoacoustiques comparativement aux protecteurs passifs.

Avant même que des alarmes ajustables soient utilisées sur le terrain, il faudra s'assurer que les algorithmes d'adaptation du niveau de l'alarme en fonction du bruit ambiant soient validés. Leur impact sur la nuisance environnementale devra également être évalué.

Enfin, les membres du comité de suivi ont souligné l'importance de procéder à des relevés sonores à l'intérieur de la cabine du camionneur et à l'intérieur de véhicules à proximité afin de s'assurer que l'alarme demeure audible au poste de conduite ou encore dans les véhicules se trouvant près du véhicule lourd en mouvement et ce, afin d'éviter de potentiels accidents. La propagation et la perception des alarmes en espace clos (p.ex. cours intérieures, entrepôts) sont aussi des problèmes qui ont été soulevés et qui demanderaient à être étudiés plus en détail, afin, notamment, de documenter l'effet des réflexions des ondes sonores sur la propagation sonore derrière les véhicules et son impact sur les capacités de localisation auditive. D'autres pistes de recherches ont aussi été évoquées lors des discussions avec le comité de suivi. Elles découlent notamment de divers problèmes mentionnés tels que; i) l'utilisation d'un rapport signal/bruit souvent trop élevé; ii) le fonctionnement et la performance des alarmes à niveau auto-ajustable très peu ou pas documentés par les manufacturiers et mal compris par les intervenants; iii) l'effet d'un mauvais positionnement des alarmes sur les véhicules peu documenté; iv) l'impact sur la localisation auditive lorsque plusieurs alarmes sont activées simultanément; v) l'effet d'avoir l'attention dirigée vers une tâche de travail sur la perception auditive des alarmes; vi) l'effet des protecteurs auditifs sur la perception des alarmes.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Abel SM & Hay VH (1996). Sound localization: The interaction of aging, hearing loss and hearing protection. *Scandinavian Audiology*, 25(1): 3-12.
- Alali KA (2011). Azimuthal localization and detection of vehicular backup alarms under electronic and non-electronic hearing protection devices in noisy and quiet environments. Doctoral dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (208 pages).
- Alali KA & Casali JG (2011). The challenge of localizing vehicle backup alarms Effects of passive and electronic hearing protectors, ambient noise level, and backup alarm spectral content. *Noise & Health*, 13(51): 99-112.
- Ahmad, M. R., Werner, E., Brunner, E. (2008), "Analysis of high-dimensional repeated measures designs: The one sample case", *Computational Statistics and Data Analysis*, 53, 416-427.
- Australian Standard 4742-2003. Earth-moving machinery – Machine-mounted forward and reverse audible warning alarm – Sound test method.
- Atherley GRC & Noble WG (1970). Effect of ear-defenders (ear-muffs) on the localization of sound. *British Journal of Industrial Medicine*, 27(3), 260-265.
- Bassett Consulting Engineers (2009). Broadband Auditory Warning Alarms. Report for SA Department for Transport, Energy and Infrastructure, doc AA0981-A9B01RP.
- Berger EH (2003). Hearing protection devices. In EH Berger, LH Royster, JD Royster, DP Driscoll & M Layne (Eds.), *The noise manual* (5th ed., pp. 379-454). Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.
- Berger EH & Casali, JG (1997). Hearing protection devices. In MJ Crocker (Ed.), *Encyclopedia of acoustics* (1st ed., pp. 967-981). New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Blauert J (1997). *Spatial Hearing*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Bliss JP, Gilson RD & Deaton JE (1995). Human probability matching behavior in response to alarms of varying reliability. *Ergonomics* 38(11): 2300-2312.
- Bliss JP & Dunn MC (2000). Behavioural implications of alarm mistrust as a function of task workload. *Ergonomics* 43: 1283-300.
- Blouin S (2005). Bilan de connaissances sur les dispositifs de detection de personnes lors des manoeuvres de recul des véhicules dans les chantiers de construction. Montréal, Canada : Études et recherches / Rapport B-067 / IRSST. Récupéré du site <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/B-067.pdf> [Consulté le 23 septembre 2011].
- Bolia RS, D'Angelo WR, Mishler PJ & Morris, LJ (2001). Effects of hearing protectors on auditory localization in azimuth and elevation. *Human Factors*, 43(1), 122-128.
- Box, G. E. P. (1953), "Non-normality and Tests on Variance," *Biometrika*, 40, 318–335.
- Box, G. E. P. (1954), "Some theorems on quadratic forms applied in the study of analysis of variance problems I: Effect of inequality of variance in the oneway classification," *Annals of Mathematical Statistics*, 25, 290-302.
- Brigade Electronics (2011) "http://www.brigade-electronics.com,"

- Burgess M & McCarty M (2009). Review of alternatives to “beeper” alarms for construction equipment. Report prepared for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages.
- Burt JL, Bartolome DS, Burdette DW, Comstock JR (1995). A psychological evaluation of the perceived urgency of auditory warning signals. *Ergonomics*, 38(11): 2327-2340.
- Butler RA (1986). The bandwidth effect on monaural and binaural localization. *Hearing Research*, 21: 67-73.
- Butler RA & Humanski RA (1992). Localization of sound in the vertical plane with and without high-frequency spectral cues. *Perception and Psychophysics*, 51(2): 182-186.
- Butler RA & Planert N (1976). The influence of stimulus bandwidth on localization of sound in space. *Perception and Psychophysics*, 19(1): 103-108.
- Catchpole KR, McKeown JD, Withington DJ (2004). Localizable auditory warning pulses, *Ergonomics* 47(7): 748-771.
- Carlile S & King AJ (1993). Auditory Neuroscience: From Outer Ear to Virtual Space. *Current Biology*, 3: 446-448.
- Casali JG & Alali KA (2010). Etymotic EB-15 (Lo Position) BlastPLG™ Evaluation: Backup Alarm Localization Appended Experiment. Auditory Systems Laboratory, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 32 pages.
- Casali JG, Robinson GS, Christian Dabney E. & Gauger D (2004). Effect of Electronic ANR and Conventional Hearing Protectors on Vehicle Backup Alarm Detection in noise. *Hum Factors*, 46(1): 1-10.
- Casali JG & Wright WH (1995). Do amplitude-sensitive hearing protectors improve detectability of vehicle backup alarms in noise? Proceedings of the 1995 Human Factors and Ergonomics Society 39th Annual Conference, San Diego, California, October 7-11, 994-998. Retrieved from
- Christian Dabney E (1999). The detection of warning signals while wearing active noise reduction and passive hearing protection devices. Master’s thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (107 pages).
- City of New York, 2007, *Notice of Adoption of Rules for Citywide Construction Noise Mitigation* Retrieved from http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/noise_constr_rule.pdf [Accessed September 23, 2011].
- Code de sécurité pour les travaux de construction, Loi sur la santé et la sécurité du travail (c. S-2.1, r. 6). Gouvernement du Québec. Récupéré du site http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FS_2_1%2FS2_1R6.htm [Consulté le 3 novembre 2011].
- Commission de la santé et de la sécurité du travail (2011). Revue de presse. Le vendredi 9 septembre 2011. Direction des communications et des relations publiques.
- Committee on Technology for a Quieter America (2010). *Technology for a Quieter America*. Washington, DC: National Academy of Engineering, National Academies Press. Retrieved from http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=12928&page=1 [Accessed September 28, 2011].
- Dempster, P. (1960), “A Significance Test for the separation of Two Highly Multivariate Small Samples,” *Biometrics*, 16, 41–50.

- Dufour J, Ratelle A, Leroux T, Gendron M. (2005) Auditory localization training model: teamwork between audiologist and O&M specialist – pre-test with a visually-impaired person using bilateral cochlear implants. *Int Congr Ser* 1282:108-112.
- Edworthy J, Loxley S & Dennis I (1991). Improving auditory warning design: Relationships between warning sound parameters and perceived urgency. *Human Factors*, 33: 205-31.
- Edworthy J & Stanton NA (1995). A user-centred approach to the design and evaluation of auditory warning signals: 1 Methodology. *Ergonomics*, 38: 2262-80.
- Federal Aviation Administration. Title 14: Aeronautics and Space, PART 36—NOISE STANDARDS: AIRCRAFT TYPE AND AIRWORTHINESS CERTIFICATION. Retrieved from <http://law.justia.com/cfr/title14/14-1.0.1.3.18.html> [Accessed January 11, 2012].
- Federal Highway Administration (2008). Effective Noise Control During Nighttime Construction. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation (updated 7 Jul 2008). Retrieved from http://ops.fhwa.dot.gov/wz/workshops/accessible/Schexnayder_paper.htm [Accessed September 28, 2011].
- Giguère C, Laroche C & Vaillancourt V (2010). « Research on Modelling the Effects of Personal Hearing Protection and Communication Devices on Speech Intelligibility in Noise”. Final Report, Department of National Defence under contract No. W7711-088145/001/TOR (March 31st, 2010).
- Grote Industries Inc. <http://www.grote.com> [Accessed September 28, 2011].
- Guillaume A, Pellieux L, Chastres V, Drake C (2003). Judging the urgency of nonvocal auditory warning signals : Perceptual and cognitive processes. *Journal of Experimental Psychology*, 9(3):196-212.
- Haas EC & Casali JG (1995). Perceived urgency of and response time to multi-tone and frequency modulated warning signals in broadband noise. *Ergonomics*, 38: 2313-26.
- Haas EC & Edworthy J (1998). The perceived urgency and detection time of multitone auditory signals. In *Human Factors in Auditory Warnings*, Eds N.A. Stanton and J. Edworthy, Ashgate, England.
- Hartmann WM (1999). How we localize sound. *Phys Today*, 52:24-9.
- Health and Safety Executive report Number 358, Improving the safety of workers in the vicinity of mobile plant (2001). Retrieved from http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/2001/crr01358.pdf [Accessed September 25, 2011].
- Hellier E & Edworthy J (1989). Quantifying the perceived urgency of auditory warnings. *Canadian Acoustics*, 17: 3-11.
- Hofman PM & Van Opstal JA (1998). Spectro-temporal factors in two-dimensional human sound localization. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(5): 2634-2648.
- Homer JP (2008). Audible warning devices used in the mining industry. Proceedings of the NOISE-CON 2008 conference from The Institute of Noise Control Engineering on July 28-31 2008, Dearborn, Michigan, USA, 12 p.
- Holzman DC (2011). Vehicle Motion Alarms: Necessity, Noise Pollution, or Both? *Environ Health Perspect*, 119: a30-a33.
- ISO 7731:2003. Ergonomics – Danger signals for public and work areas – Auditory danger signals.

- ISO 7029:2000. Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age ‘Acoustics. Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age’, BS EN
- ISO 9533:1989. Earth-moving machinery – Machine-mounted forward and reverse audible warning alarm – Sound test method.
- ISO 1996-1: 2003. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures.
- Laferrière P (2010). Backup Alarm Testing Application Suite. User’s Guide. Hearing Research Laboratory, University of Ottawa, 29 pages.
- Lakatos S & Miller GG (2009). Psychoacoustic evaluation of listener localization accuracy for broadband and conventional alarms. Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration, Kraków, Poland (5-9 July 2009), 8 p.
- Laroche C (2006). Investigation of an accident involving the reverse alarm on a heavy vehicle. Proceedings IEA 2006. Congress, International Ergonomics Association 16th World Congress, Maastricht, Netherlands (July 2006), 6 p.
- Laroche C & Denis S (2000). Bilan des connaissances sur la signalisation acoustique et les chariots élévateurs. Rapport préparé dans le cadre d’un devis d’activités (Subv. 99-029), IRSST, 64 p.
- Laroche C, Héту R & L’Espérance A (1991). Des alarmes de recul qui tuent! *Travail et santé*, 7(1): 9,11,13.
- Laroche C & Lefebvre L (1997). Improvement in the acoustic characteristics of reverse alarms used on vehicles. Proceedings of the 13th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Tampere, Finland, 3, 99-102.
- Laroche C & Lefebvre L (1998). Determination of optimal acoustic features for reverse alarms: Field measurements and the design of a sound propagation model. *Ergonomics* 41: 1203-1221.
- Laroche C, Ross M-J, Lefebvre L & Larocque R (1995). Détermination des caractéristiques optimales des alarmes de recul. Études et Recherches / Rapport R-117, Montréal, Québec, Canada: Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, 89 pages. Récupéré du site <http://www.irsst.qc.ca/en/-irsst-publication-determination-of-the-optimal-acoustic-characteristics-of-backup-alarms-r-117.html>. [Consulté le 8 septembre 2011].
- Leventhall G (2007). The Loudness of White Sound Alarms and Audibility over Machine Noise. Brigade Electronics plc, October 2007. Retrieved from <http://www.brigade-electronics.com/sites/default/files/Loudness%20of%20Broadband%20Alarms%20Final.pdf>. [Accessed September 23, 2011].
- Lovejoy SM (2008, July 25). *Determination of backup alarm masked threshold in construction noise*. Blacksburg, VA: Virginia Tech. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu.ezproxy.lib.vt.edu:8080/theses/available/etd-06042008-203917/> [Accessed September 28, 2011].
- Makous JC & Middlebrooks JC (1990). Two-dimensional sound localization by human listeners. *J Acoust Soc Am*, 87: 2188-2200
- Martin N & Clark SG (2003). Introduction to Audiology. Eight edition. Boston: Allyn and Bacon.

- Mauchly JW (1940). Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11, 204–209.
- Middlebrooks JC & Green DM (1991). Sound localization by human listeners. *Annu Rev Psychol*, 42: 135-59.
- Moore BCJ (1982). An introduction to the psychology of hearing. London: Academic Press.
- Morgan H (2007). Back-Up Safety Alarms Minimize Environmental Noise Exposure and Focus Warning Signals. *Sound and Vibration*, February 2007. Retrieved from http://findarticles.com/p/articles/mi_qa4075/is_200702/ai_n19198181/. [Accessed March 19, 2010].
- Morgan HP & Peppin RJ (2008). “Noiseless” and safer back-up alarms. Proceedings of the NOISE-CON 2008 conference from The Institute of Noise Control Engineering on July 28-31 2008, Dearborn, Michigan, USA, 8p.
- Murray W, Mills J & Moore P (1998). Reversing Accidents in UK Transport Fleets 1996-1997, University of Huddersfield Report.
- NIOSH (2004). The Worker Health Chartbook 2004 Publication 2004-146. Retrieved from <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2004-146/> [Accessed September 25, 2011].
- Nixon CW & Berger EH (1998). Hearing protection devices. In C. M. Harris (Ed.), *Handbook of acoustical measurements and noise control* (3rd ed., pp. 21.1-21.24). Woodbury, NY: Acoustical Society of America.
- Noble WG (1981). Earmuffs, exploratory head movements, and horizontal and vertical sound localization. *Journal of Auditory Research*, 21: 1-12.
- Noble W, Murray N & Waugh R (1990). The effect of various hearing protectors on sound localization in the horizontal and vertical planes. *American Industrial Hygiene Association journal*, 51: 370-377.
- Noble WG & Russell G (1972). Theoretical and practical implications of the effects of hearing protection devices on localization ability. *Acta Otolaryngol*, 74: 29-36.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Occupational safety and health standards: Motor vehicles (29 CFR, Part 1926.601). Washington, DC : Office of the Federal Register, 2000. Retrieved from http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=10768 [Accessed September 25, 2011].
- Petocz A, Keller PE, Stevens CJ (2008). Auditory warnings, signal-referent relations, and natural indicators: Re-thinking theory and application. *Journal of Experimental Psychology; Applied*, 14(2): 165-178.
- Purswell JP & Purswell JL. The effectiveness of audible backup alarms as indicated by OSHA accident investigation records. In: Bittner AC, Champney PC, Morrissey SJ, editors. *Advances in Occupational Ergonomics and Safety*. Amsterdam, the Netherlands. ISO Press; 2001. p. 444-450.
- Recanzone GH, Makhramra SDDR & Guard DC (1998). Comparison of relative and absolute sound localization ability in humans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(2): 1085-1097.
- Robinson GS & Casali JG (1995). Audibility of reverse alarms under hearing protectors for normal and hearing-impaired listeners. *Ergonomics*, 38(11): 2281-2299.

- RRK Jones (2004). Audibility of Warning Horns. Broadband Horn Evaluation. A report produced for Rail Safety and Standards Board, November 2004, 12p. Retrieved from <http://www.rssb.co.uk/sitecollectiondocuments/pdf/reports/Audibility%20of%20Warning%20Horns%20-%20Broadband%20Horn%20Evaluation.pdf> [Accessed September 23, 2011].
- SAE J994 (2009). Alarm – Backup – Electric Laboratory Performance Testing. Society of Automotive Engineers.
- SAE J1741 (1999). Discriminating Back-up Alarm System. Society of Automotive Engineers.
- Scharf B & Fishken D (1970). Binaural summation of loudness: Reconsidered. *Journal of Experimental Psychology*, 86: 374-379.
- Seattle District Safety Gram – Engineering the Edge for Safety Excellence (2009). Workplace Safety: Backup Alarms, September 15th, 2009. Retrieved from <http://www.nonoise.org/resource/construc/safetygram.pdf> [Accessed September 23, 2011].
- Simpson DB, Bolia RS, McKinley RL & Brungart DS (2005). The impact of hearing protection on sound localization and orienting behavior. *Human Factors*, 47: 188-98.
- Society of Automotive Engineers (2005). SAE Presents Environmental Excellence in Transportation Awards [online]. SAE International. June 22, 2005. Retrieved from www.sae.org/news/releases/05transportation_award.htm [Accessed September 23, 2011].
- Strivastava, M. S. (2005), “Some tests concerning the covariance matrix in high-dimensional data,” *J. Japan Stat. Soc.*, 35, 251–272.
- Trahiotis C & Stern RM (1989). Lateralization of bands of noise: effects of bandwidth and differences of interaural time and phase. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(4): 1285-1293.
- Tran Quoc H & Héту R. (1996). La planification de la signalisation acoustique en milieu industriel: critères de conception des avertisseurs sonores de danger. *Acoustique canadienne*, 24: 3-17.
- Vaillancourt V, Laroche C, Giguère C, Beaulieu MA & Legault JP. (2011). Evaluation of Auditory Functions for Royal Canadian Mounted Police Officers. *Journal of the American Academy of Audiology*, 22: 313-331.
- Withington DJ (1996). The quest for better ambulance sirens. *Ambulance UK*, 11: 20-21. Retrieved from <http://www.soundalert.com/pdfs/ambuk.pdf> [Accessed September 23, 2011].
- Withington DJ (1999). Localisable Alarms. Extract from *Human Factors in Auditory Warnings* – Edited by Neville A Stanton & Judy Edworthy, Published by Ashgate Publishing Ltd 1999, ISBN 0-291-39849-9. Retrieved from http://www.systemsensor.com/ep/pdf/localisable_alarms.pdf [Accessed Sept. 28, 2010].
- Withington D (2000). The use of directional sound to improve the safety of auditory warnings. Paper presented at the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association & 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, San Diego, August 1st 2000.
- Withington D.J. (2004). Reversing Goes Broadband. *Quarry Management Journal*. May 2004. Retrieved from http://www.agg-net.com/files/qmj-corp/Reversing%20goes%20Broadband_0.pdf [Accessed September 23, 2011].

- Withington DJ (2004). Reversing Goes Broadband. *Quarry Management*, May 2004, 5 pages. Retrieved from http://www.agg-net.com/files/qmj-corp/Reversing%20goes%20Broadband_0.pdf [Accessed September 28, 2011].
- Withington DJ & Paterson SE (1998). Safer Sirens. *Fire Engineers Journal*, 48: 6-10. Retrieved from <http://www.soundalert.com/pdfs/fej.pdf> [Accessed September 23, 2011].
- Zheng Y, Giguere C, Laroche C, Sabourin C, Gagné A & Elyea M. (2007). A psychoacoustics model for specifying the level and spectrum of acoustic warning signals in the workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(2): 87-98.

Annexe A ACCIDENTS MORTELS AUX ÉTATS-UNIS ENTRE 1992-2007

Le tableau ci-dessous est une synthèse de 19 écrasements mortels impliquant un véhicule en marche arrière survenus sur des chantiers de construction aux États-Unis entre 1992 et 2007. Les données du tableau ont été répertoriées à partir de la banque de données électronique du NIOSH disponible à l'adresse http://www.workzonesafety.org/runover_backover/case_studies.

Tableau 2 : Synthèse des cas d'accidents mortels survenus aux États-Unis entre 1992-2007 (source: banque de données électronique du NIOSH).

# dossier	Année	Travailleur	Type de camion	Alarme de recul	Niveau de bruit
00CA005	2000	Inspecteur	Camion-benne pour bitume (10 roues)	Opérationnelle et fonctionnelle	Non spécifié
00CA006	2000	Signaleur et contrôleur de la circulation	Tracteur semi-remorque avec benne sur le côté (10 roues)	Opérationnelle et fonctionnelle	Non spécifié
01CA004	2001	Contrôleur de la circulation	Camion-benne (10 roues)	Non spécifié	Non spécifié
01CA008	2001	Inspecteur	Niveleuse	Opérationnelle et fonctionnelle	Pas spécifié, mais facteur bruit mentionné
00WI074	2000	Ouvrier	Camion-benne	Opérationnelle + lumières pour recul	Non spécifié
07CA001	2007	Ouvrier	Camion-benne	Opérationnelle et fonctionnelle	Non spécifié
96IA055	1996	Ouvrier	Camion d'élargissement de la chaussée	Opérationnelle et fonctionnelle	Non spécifié
00-MA-61-01	2002	Policier	Camion-benne à bitume (10 roues)	Absente	Pas spécifié, mais facteur bruit mentionné (n'a pas entendu les gens crier)
01-MA-039-01	2001	Policier	Camion-benne à bitume	Opérationnelle et fonctionnelle	Non spécifié
95MA039	1995	Ouvrier	Tracteur semi-remorque	Absente	Non spécifié
MN9207	1992	Ouvrier - pavage	Camion-benne	Opérationnelle et fonctionnelle	Site de construction bruyant
97MN047	1997	Ouvrier - pavage	Véhicule à chenilles	Présente mais pas activée	Non spécifié
98MN030	1998	Ouvrier sur un chantier de construction	Chariot élévateur à prise frontale	Présente mais pas activée	Non spécifié
96MO012	1996	Superviseur réparation routière (contremaître)	Camion-benne	Opérationnelle et fonctionnelle	Multiples voies de circulation
04NE007	2004	Agent technique	Camion-benne	Alarme de recul et lumières de recul (alarme entendue par témoin)	Non spécifié
04NE040	2004	Cimentier-finiisseur construction routière	Camion-benne	Alarme de recul et lumières de recul (alarme entendue par témoins)	Non spécifié
03OK04701	2003	Ouvrier-construction routière	Camion-benne à bitume	Alarme de recul à 97 dB et entendue par au moins un témoin	Non spécifié
00WA041	2000	Ouvrier de la ville et contremaître	Camion-benne	Opérationnelle et fonctionnelle (superintendant ne se souvient pas d'avoir entendu l'alarme; l'ouvrier parlait au cellulaire)	Non spécifié
99WA07001	1999	Signaleur - construction routière	Camion-benne	Opérationnelle et fonctionnelle	Non spécifié

Annexe B EXEMPLES D'UTILISATION D'ALARMES DE TYPE BBS

Tableau 3 : Exemples d'utilisation de la technologie des alarmes à large bande de fréquences. Toutes les sources énumérées étaient accessibles en ligne en date du 25 septembre 2011.

Compagnie / Organisme / Projet	Bénéfices rapportés / anticipés	Source	Site internet
2012 Olympics Code of Construction Practice (UK)	Réduction de la pollution sonore	Olympic Delivery Authority (2007). Code of Construction Practice, December 2007; Burgess & McCarty, 2009	www.london2012.com/documents/oda-health-and-safety/code-of-construction-practice-final-low-res.pdf http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Arizona Materials (USA)	Réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. (2006). The noiseless back-up alarm. November 2006 Newsletter	http://www.noisefree.org/brigade_electronics-newsletter.pdf
ASDA (UK)	Réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. Vehicle Safety Solutions. Bbs-tek White Sound Warning Alarms. Brochure	http://www.brigade-inc.com/sites/default/files/bbs-tek%20brochure.pdf
British Airports Authority (BAA)	Santé (réduction des niveaux d'exposition)	Brigade Electronics Inc. Vehicle Safety Solutions. Bbs-tek White Sound Warning Alarms. Brochure	http://www.brigade-inc.com/sites/default/files/bbs-tek%20brochure.pdf
Burlington Slate Ltd (UK)	Réduction de la pollution sonore	UK trade journal Mining and Quarry World (Sept/Oct 2002) dans Burgess M. & McCarty M. (2009). Review of alternatives to 'beeper' alarms for construction equipment. Report for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages	http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Day Group (UK)	Réduction de la pollution sonore	Safety and Health Practitioner (2002). Reversing alam. (Products & Services). The Safety & Health Practitioner, December 1, 2002; Burgess & McCarty	http://www.accessmylibrary.com/article-1G1-95829275/reversing-alam-products-services.html , http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Grace Pacific corporation (USA)	Réduction des plaintes	Morgan H. (2007). Back-up Safety Alarms Minimize Environmental Noise Exposure and Focus Warning Signals. Sound and Vibration, February 2007; Burgess & McCarty, 2009	http://findarticles.com/p/articles/mi_q4075/is_200702/ai_n19198181/ , http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Greater London Authority (UK)	Réduction de la pollution sonore	Greater London Authority (2005). New reversing alarms cut noise pollution. Press release, 27 October 2005	http://www.london.gov.uk/media/press_releases_majoral/new-reversing-alarms-cut-noise-pollution
Hanson Aggregates (USA)	Sécurité et réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. (2006). The noiseless back-up alarm. November 2006 Newsletter Brigade Electronics PLC (2009). Broadband Sound. The safer and noiseless back-up alarm. A Brigade white paper, March 2009, 16 pages.	http://www.noisefree.org/brigade_electronics-newsletter.pdf http://www.brigade-inc.com/sites/default/files/whitepaper_UK_.pdf
Ibstock Brick (UK)	Santé (réduction des niveaux d'exposition) et réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics PLC (2009). Broadband Sound. The safer and noiseless back-up alarm. A Brigade white paper, March 2009, 16 pages. www.ibstock.com	http://www.brigade-electronics.com/sites/default/files/whitepaper_UK_.pdf http://www.ibstock.com/sustainability.asp
Memphis Stone & Gravel Company (USA)	Réduction de la pollution sonore	Parks AJ (2008). Broadband Alarms: A Tangible Part of Memphis Stone & Gravel Company's Noise Reduction Strategy. Special Report, Missouri University of Science and Technology, Department of Mining Engineering, January 3, 2008, 14 pages; Burgess & McCarty, 2009	http://www.msgravel.com/assets/1312/Broadband_Noise_Strategy.pdf , http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Middleborough Road Rail Separation Project (Victoria, Australia)	Sécurité et réduction de la pollution sonore	Vic Worksite Safety Update No 59 dans Burgess M. & McCarty M. (2009). Review of alternatives to 'beeper' alarms for construction equipment. Report for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages	http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
New York Department of sanitation	Réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. (2006). The noiseless back-up alarm. November 2006 Newsletter	http://www.noisefree.org/brigade_electronics-newsletter.pdf
Quarries National Joint Advisory Committee (UK)	Sécurité	Brigade Electronics Inc. (2006). The noiseless back-up alarm. November 2006 Newsletter	http://www.noisefree.org/brigade_electronics-newsletter.pdf
Sainsbury's Superstore (UK)	Réduction de la pollution sonore	The Noise Abatement Society (2010). QODS IVB Site Assessment, November 5, 2010, 8 pages.	http://www.trt-ltd.com/information/QODS/Reports/Annex4/Sainsburys_Bournemouth.pdf
Scottish Environment Protection Agency (UK)	Réduction de la pollution sonore	Scottish Environment Protection Agency. Environmental Best Practice Guidance Note – noise emissions from vehicle reversing alarms.	www.sepa.org.uk/air/pollution_prevention_/idoc/ashv?_1
Seattle Noise Variance (USA)	Réduction de la pollution sonore	OE Parts, LLC. (2009). Finally! A Safe Solution to the Annoying Beep-Beep Sound. Technology News, April 2009 Government Edition.	http://www.teamsters155.org/pdf/GOV_Tech_News_3_2009.pdf
South Australia Department for Transport, Energy and Infrastructure (Australia)	Réduction de la pollution sonore et des plaintes, plus facile à localiser le véhicule	Bassett Consulting Engineers (2009). Boradband Auditory Warning Alarms, report for SA Department for Transport, Energy and Infrastructure, doc AA0981-A9B01RP dans Burgess M. & McCarty M. (2009). Review of alternatives to 'beeper' alarms for construction equipment. Report for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages	http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
State of Massachussets - Department of Conservation and Recreation (USA)	Réduction de la pollution sonore	Department of Conservation and Recreation (2009). Boston University Bridge Rehabilitation Project. State of Massachussets Department of Conservation and Recreation, June 30, 2009.	http://www.mass.gov/dcr/news/publicmeetings/materials/bubridge7-30-09.pdf
Tarmac (UK)	Sécurité et réduction de la pollution sonore	HUB Magazine (2007). Ringing Endorsements for Broadband Reversing, 22 March 2007	http://www.hub-4.com/news/461/ringing-endorsements-for-broadband-reversing
The Noise Abatement Society (UK)	Réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. Vehicle Safety Solutions. Bbs-tek White Sound Warning Alarms. Brochure; Burgess & McCarty, 2009	http://www.brigade-inc.com/sites/default/files/bbs-tek%20brochure.pdf , http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
The Pentagon (USA)	Réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. (2006). The noiseless back-up alarm. November 2006 Newsletter	http://www.noisefree.org/brigade_electronics-newsletter.pdf
The Sims Group (UK)	Sécurité	Health and Safety Executive (HSE). Waste management and recycling case studies; Burgess & McCarty, 2009	www.hse.gov.uk/waste/casestudies.htm , http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Travis Perkins (UK)	Réduction de la pollution sonore	Forkliftaction.com (2002). Brigade reversing alams solve noise pollution problems. Newsletter #085, 27 November 2002	http://www.forkliftaction.com/news/newsdisplay.aspx?nwid=724
UK Olympic Development Authority (UK)	Réduction de la pollution sonore	OE Parts, LLC. (2009). Finally! A Safe Solution to the Annoying Beep-Beep Sound. Technology News, April 2009 Government Edition. Burgess M. & McCarty M. (2009). Review of alternatives to 'beeper' alarms for construction equipment. Report for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages	http://www.teamsters155.org/pdf/GOV_Tech_News_3_2009.pdf http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
Washington State Department of Transportation (USA)	Réduction de la pollution sonore	OE Parts, LLC. (2009). Finally! A Safe Solution to the Annoying Beep-Beep Sound. Technology News, April 2009 Government Edition.	http://www.teamsters155.org/pdf/GOV_Tech_News_3_2009.pdf
Waste Management Republic Port of Houston (USA)	Réduction de la pollution sonore	Brigade Case Studies. Port of Houston to curb noise nuisance Burgess M. & McCarty M. (2009). Review of alternatives to 'beeper' alarms for construction equipment. Report for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages	http://www.brigade-electronics.com/industries/case-studies/port-houston-curb-noise-nuisance http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf
WBB Minerals (UK)	Réduction de la pollution sonore	Brigade Electronics Inc. (2006). The noiseless back-up alarm. November 2006 Newsletter UK trade journal Mining and Quarry World (Jul/Aug 2002) dans Burgess M. & McCarty M. (2009). Review of alternatives to 'beeper' alarms for construction equipment. Report for the Department of Environment and Climate Change NSW Government, 8 May 2009, 69 pages	http://www.noisefree.org/brigade_electronics-newsletter.pdf http://www.environment.nsw.gov.au/resources/noise/beeperalarm.pdf

Annexe C SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES ALARMES

C.1 ALARME TONALE

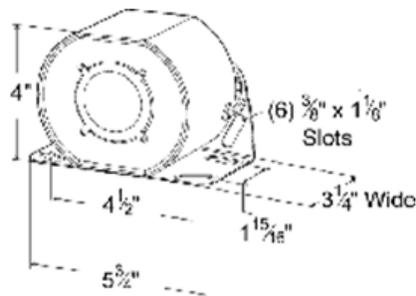
Grote 73030 – Field selectable backup alarm (information tirée du site web de la compagnie Grote)

[Catalog search page](#) > [Hazard and Warning Devices](#) > product sheet

Field-Selectable Backup Alarm



[Enlarge image](#)



[Enlarge image](#)

PRODUCT NUMBER

73030 - 107 or 112 Selectable
Decibels

FEATURES & BENEFITS

- Electronics sealed in epoxy for protection against dust, vibration and moisture
- Adjusts to SAE type A or B for medium to high noise
- 12- to 36- volts
- Selectable volume control, 107 or 112 decibels by reversing the leads
- Universal mount

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Material: Steel

FMVSS:

SAE J994 Type A or B

Finish: Blue

Voltage Amp: 12V - 36V / .6A at 12V

C.2 ALARME MULTI-TONALE

Le signal multitonale a été synthétisé numériquement (fichier .wav) et généré à l'aide du dispositif de l'alarme Grote 73030 en remplaçant le signal tonal intégré à l'unité par le signal simulé externe constitué des trois fréquences à 1000, 1150 et 1300 Hz. La trace temporelle de l'alarme multi-tonale est identique à celui de l'alarme tonale.

C.3 ALARME LARGE-BANDE

BBS-107 / Heavy Duty / 107 decibels (information tirée du site web de la compagnie Brigade Electronics)

BBS-107 - Heavy Duty - 107 Decibels



Alternative models

[BBS-102 - Heav Duty - 102 Decibels](#)

Learn more about:

Alarms-White Sound

The safest alarms in the world due to their instant locatability and directional sound. The multi-frequency alarms are only heard in the danger zone, thus eliminating noise nuisance for local residents.

[Read more](#)

Description

Heavy duty, market leading, white sound reversing alarm, ideal for vehicles working in high ambient noise levels. The safest reversing alarm on the market.

Decibel ratings: **102dB or 107dB**.

Information

Product code: 0899

Volts: 12-24Vdc

IP Rating: 68

Size (WxHxD): 172 x 79 x 95mm

Warranty: Life



Features	Power	Durability & Standards
Mechanical vibration: 10G		
Operating temperature: -40 to +85°C		
CE Marked: ✓		
EMC Approved: e		
SAE J994: ✓		

C.4 TRACE TEMPORELLE DES ALARMES

La Figure 11 présente la trace temporelle des trois alarmes retenues. On y constate que, sur une période de trois secondes, on retrouve trois cycles « on-off » pour les alarmes tonale et multi-tonale, et quatre cycles « on-off » pour l'alarme large-bande

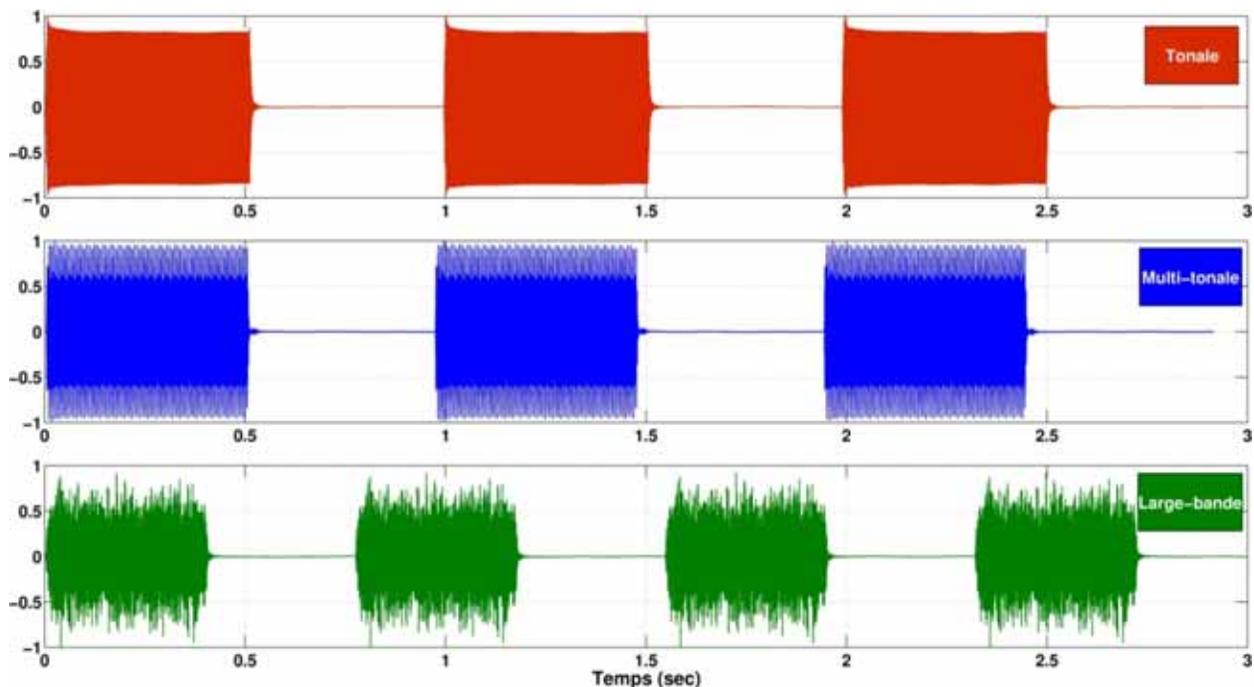


Figure 11 : Trace temporelle des trois alarmes sur une période de trois secondes.

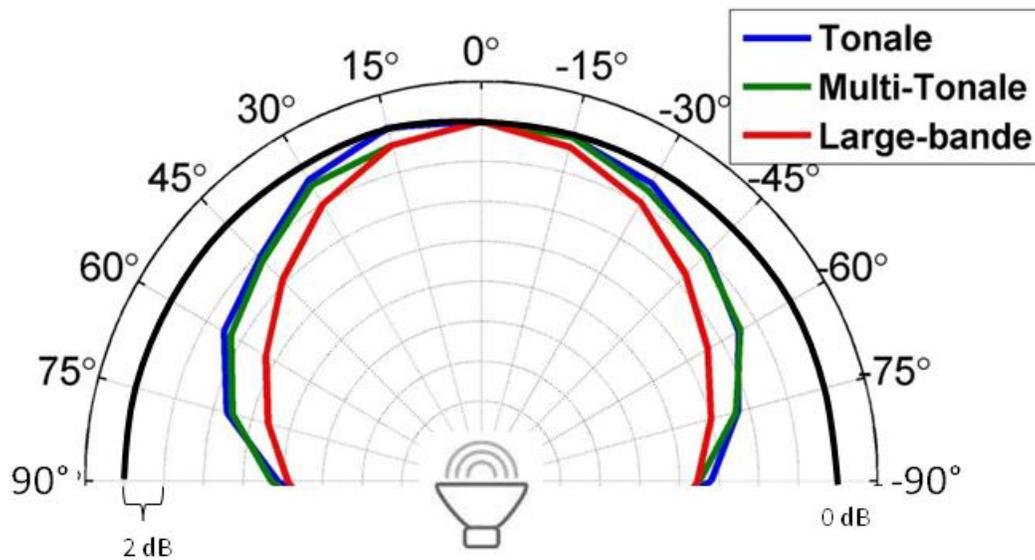
C.5 DIRECTIVITÉ DES ALARMES EN MILIEU SEMI-ANÉCHOÏQUE

Une mesure des patrons de directivité des alarmes prises isolément a été effectuée en chambre semi-anéchoïque. Cette mesure consistait à mesurer le niveau de pression à un microphone situé à environ 1 m de l'alarme et de faire varier la position de ce microphone dans le plan horizontal avec un incrément angulaire de 15° (voir Figure 12a)⁹. On trace ensuite la déviation par rapport au niveau obtenu en $\theta=0^\circ$, en dB. Les résultats sont montrés à la Figure 12b. On y observe que les alarmes ne sont pas tout à fait omnidirectionnelles, des différences de niveau de l'ordre de 4-5 dB étant obtenues lorsque l'on se trouve à plus de 45° sur les côtés. Ces différences sont un peu plus importantes pour l'alarme large-bande.

⁹ Il est à noter que le protocole utilisé pour cette mesure de directivité ne suivait aucune norme en particulier.



(a)



(b)

Figure 12 : Patrons de directivité des alarmes utilisées; (a) photo du montage de mesure; (b) écart du niveau de bruit par rapport à la valeur à $\theta=0^\circ$.

Annexe D DÉFINITION DES POSITIONS DES MICROPHONES POUR LES MESURES TERRAINS

D.1 POSITION DES MICROPHONES SELON ISO 9533

La Figure 13 et le Tableau 4 ci-dessous montrent le positionnement et les coordonnées des microphones utilisés pour la mesure des ajustements du niveau des alarmes. Les positions définies dans la norme ISO 9533 (1989) sont utilisées. Il est à noter qu'une version plus récente de la norme, datant de 2010, est maintenant disponible. Des positions additionnelles de microphones y sont spécifiées. Cependant, cette version n'était pas disponible au moment des tests terrain.

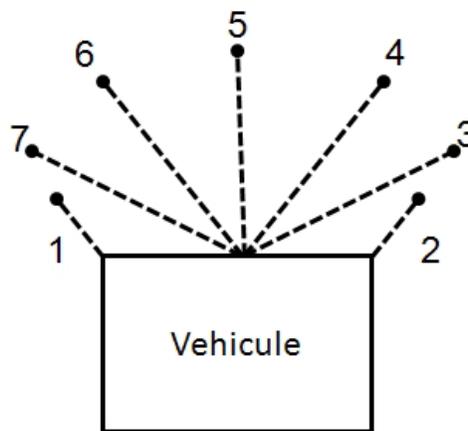


Figure 13 : Illustration du positionnement des microphones tel que défini dans ISO 9533

Tableau 4 : Position des microphones telle que définie dans ISO 9533

Microphone	Distance (m) et direction	
1	0,7 gauche	0,7 arrière
2	0,7 droite	0,7 arrière
3	4,9 droite	4,9 arrière
4	2,7 droite	6,5 arrière
5	0	7,0 arrière
6	2,7 gauche	6,5 arrière
7	4,9 gauche	4,9 arrière

D.2 DISPOSITION DES AXES POUR LE BALAYAGE MICROPHONIQUE

La figure ci-dessous montre les lignes de balayage utilisées pour la mesure du champ acoustique derrière les véhicules. Neuf lignes partant du véhicule et deux lignes courbes à 2 m et 4 m ont été utilisées.

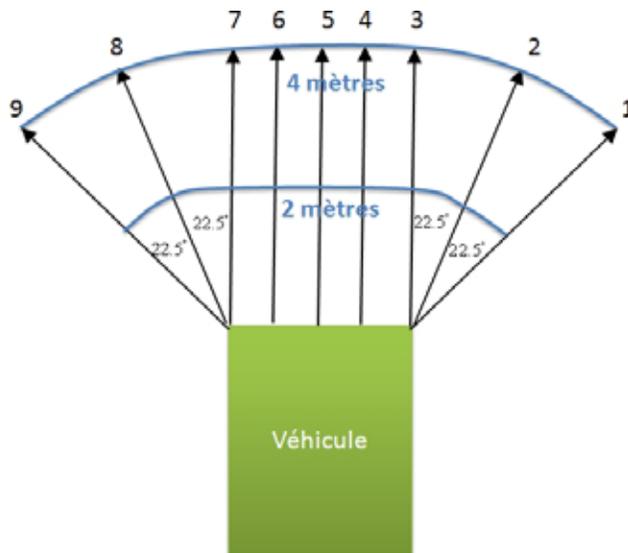


Figure 14 : Définition des lignes de balayage pour la mesure du champ sonore derrière le véhicule

Annexe E MILIEUX DE TRAVAIL, VÉHICULES & AMBIANCES SONORES SÉLECTIONNÉS

Le tableau ci-dessous dresse un sommaire des milieux de travail visités ainsi que des véhicules utilisés pour les tests terrain de propagation sonore. Milieux de travail, Véhicules et ambiances sonores sélectionnés

Tableau 5: Sommaire des véhicules utilisés et lieux visités

Compagnie	Type de sol	Véhicule
A – Produits minéraux	Gravier, roches et terre dure	
A – Produits minéraux	Terre battue, poussières et gravier	
B – Produits du bois	Terre battue	

Description des ambiances sonores retenues

Quatre enregistrements sonores ont été retenus et le contenu fréquentiel de ceux-ci est illustré à la Figure 4 (voir section 4.2.4). Le premier bruit (Bruit 1 – carrière) est un bruit de bourdonnement qui contient beaucoup d'énergie en basses fréquences et dont le niveau sonore global est d'environ 80,5 dBA. Le deuxième bruit (Bruit 2 – carrière) consiste également en un bourdonnement relativement stable avec un niveau sonore global de 83,3 dBA. Le Bruit 3 (scierie) est caractérisé par des battements, du bruissement et du craquèlement associé à l'expulsion de copeaux de bois. Son niveau sonore global s'élève à 85,9 dBA. Finalement, le Bruit 4 (scierie) peut être décrit par un bourdonnement dont le niveau sonore global s'élève à 89,6 dBA dans lequel on y entend des moteurs de véhicules ainsi que de sons faibles en haute fréquence. Les environnements dans lesquels les bruits ont été échantillonnés sont présentés à la Figure 15.

Bruit 1



Bruit 2



Bruit 3



Bruit 4



Figure 15 : Environnements utilisés pour l'échantillonnage des ambiances sonores

Annexe F **DESCRIPTION DU LABORATOIRE ET DES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS**

Cette annexe présente les cabines et les équipements qui ont été utilisés pour effectuer les épreuves psychoacoustiques avec les participants au Laboratoire de recherche en audition de l'Université d'Ottawa.

F.1 TÂCHES DE DETECTION, D'ÉGALISATION DE LA SONIE & D'ÉVALUATION DU DEGRÉ D'URGENCE

Les tâches de détection sonore, d'égalisation de la sonie et d'évaluation du degré d'urgence ont été effectuées dans la cabine versatile (Eckel Industries). Les murs et le plafond de cette cabine insonorisée consistent en des panneaux formés de matériaux réfléchissants ou absorbants et permettent ainsi de recréer divers environnements sonores en modifiant les propriétés acoustiques de la salle. La Figure 16 montre un schéma de la salle avec les haut-parleurs utilisés. Un haut-parleur situé devant à 1 m du centre de la tête de l'individu (S7 sur la figure) était utilisé pour présenter les alarmes alors que 5 haut-parleurs additionnels (S1 à S5) et un caisson de basse (S6) servaient à recréer en champ sonore le bruit ambiant. Il est à noter que les quatre bruits ambiants ont été reproduits dans la salle aux niveaux sonores mesurés sur le terrain, soit 81 dBA pour le bruit 1, 83 dBA pour le bruit 2, 86 dBA pour le bruit 3 et 89 dBA pour le bruit 4. Des logiciels informatisés (Laferrière, 2010) conçus aux fins de ce projet nécessitaient l'utilisation de deux ordinateurs. Un ordinateur standard manipulé par l'expérimentateur servait à présenter les divers stimuli (alarmes et bruits) et à spécifier leurs caractéristiques acoustiques (p. ex. niveau de présentation initial, grandeur du pas utilisé pour régler les niveaux sonores, etc) alors qu'un ordinateur tablette était utilisé par les participants pour varier les propriétés du signal (par ex. le volume ou le degré d'urgence) et pour enregistrer leurs réponses.

F.2 LOCALISATION AUDITIVE

Les épreuves de localisation auditive ont été effectuées dans une cabine insonorisée IAC à double paroi à l'aide du SELA (Système d'évaluation de la localisation auditive; Dufour et al, 2005). Un arc de localisation de 180° sur lequel étaient placés douze haut-parleurs Realistic Minimus ayant une réponse en fréquence similaire a servi à présenter les alarmes de recul, alors que le bruit ambiant émanait d'un haut-parleur fixé au plafond directement au-dessus de la tête du participant. Tel qu'indiqué à la Figure 17 illustrant l'arc de 0 à 180°, le premier haut-parleur était positionné à 7.5° et 15° séparaient les haut-parleurs voisins. Un amplificateur externe (Techron 5507) permettait d'ajuster le niveau sonore du bruit ambiant et des alarmes, alors qu'un lecteur de CD (Max dVP-6100) était utilisé pour faire jouer le fichier de bruit.

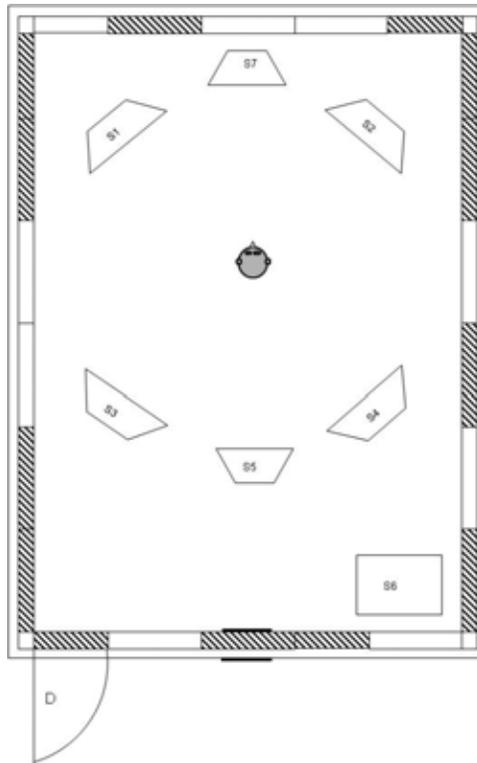


Figure 16 : Schéma de la salle utilisée pour les tâches de détection, d'égalisation de la sonie et d'évaluation du degré d'urgence

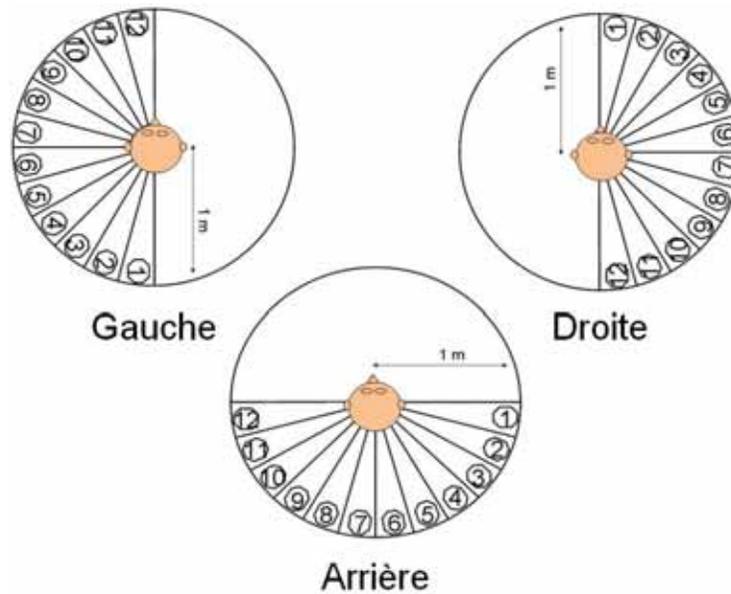


Figure 17 : Position des haut-parleurs pour les tests de localisation auditive

Annexe G **RÉSULTATS – CHAMP SONORE DERRIÈRE LE VÉHICULE**

Les figures qui suivent montrent les résultats de champ sonore obtenus à l'aide de la mesure par balayage du microphone pour les sites 2 et 3 (les résultats pour le site 1 sont présentés à la section 5.2.2). Les résultats pour les trois sites visités ainsi que pour les deux conditions de montage des alarmes sont présentés. Les niveaux globaux de bruit (L_{eq} exprimé en dB(A)) sont affichés. Chaque changement de couleur correspond à une variation de 3 dB du niveau global.

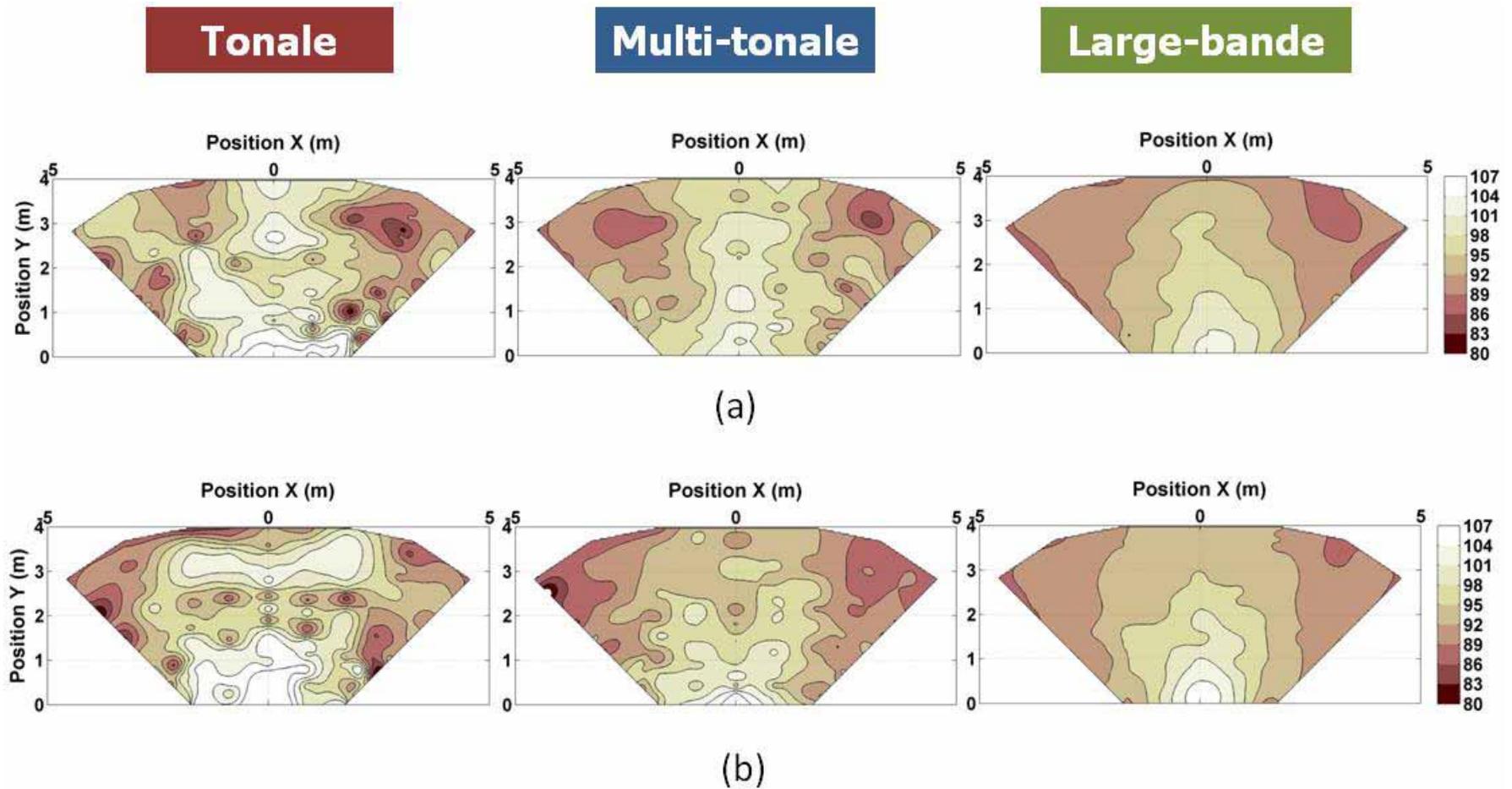


Figure 18 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) derrière le véhicule au Site 2 : (a) alarme en position « réaliste »; (b) alarme en position « idéale ».

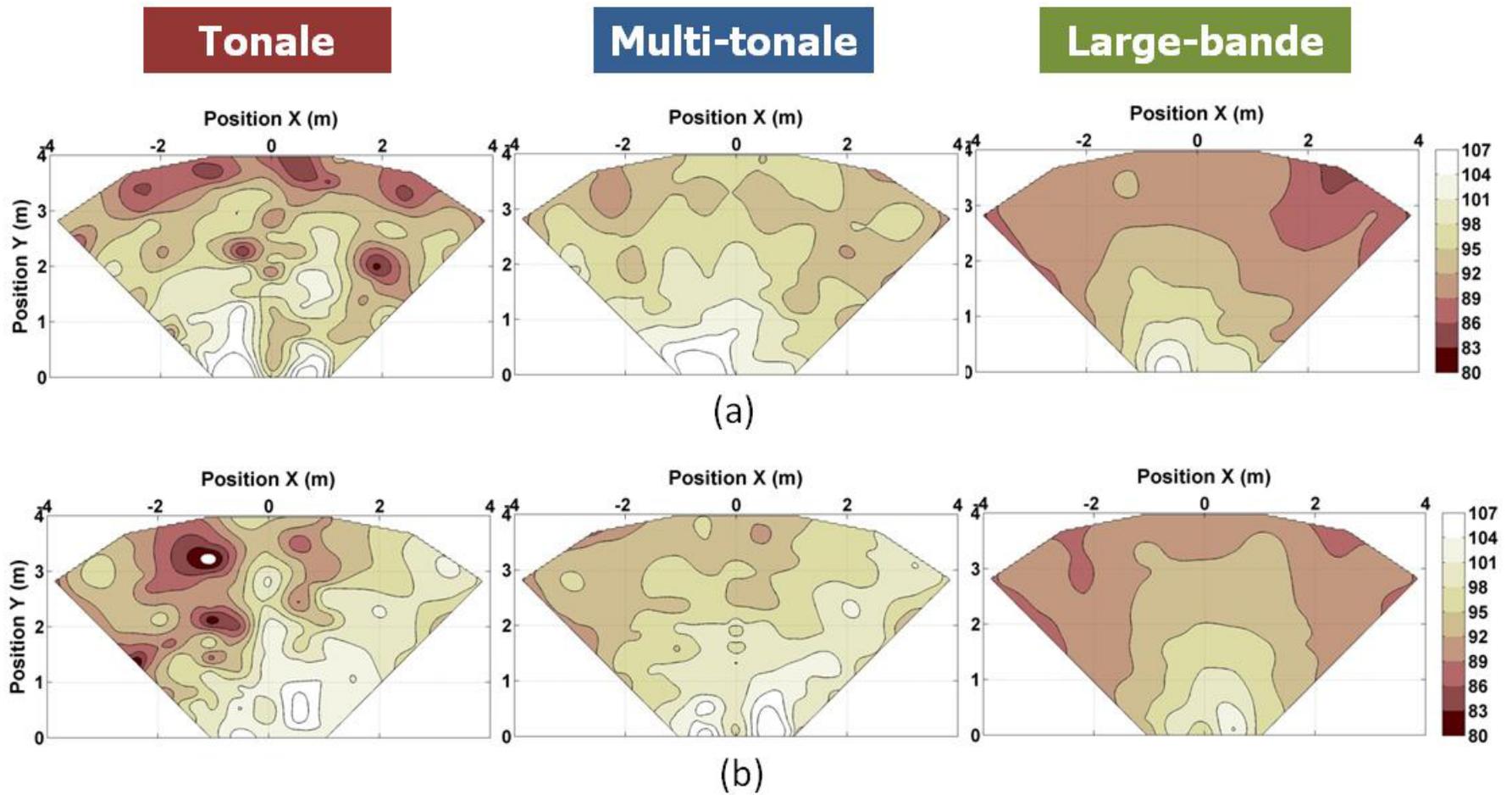


Figure 19 : Niveau de bruit (Leq : dB(A)) derrière le véhicule au Site 3 : (a) alarme en position « réaliste »; (b) alarme en position « idéale ».

Annexe H **RÉSULTATS – ÉPREUVES PSYCHOACOUSTIQUES**

Cette annexe décrit les analyses statistiques détaillées pour les mesures psychoacoustiques des seuils de détection, d'égalisation de la sonie, de l'évaluation du degré d'urgence ainsi que de la localisation auditive. Puisque les données ne rencontrent pas plusieurs conditions nécessaires aux analyses univariées, entre autres que les composantes orthogonales des moyennes intrasujets ne sont pas sphériques, des méthodes d'analyse multivariée basées sur la statistique de type ANOVA de Ahmad et coll. (2008) ont été utilisées. Il s'agit en fait d'une modification pour les données hautement dimensionnelles (c.-à-dire le nombre de mesures par participants est plus grand que le nombre de participants) de l'approximation de Box (1954).

Le logiciel SAS 9,2 a été utilisé comme outil de base, mais de la programmation, avec la procédure IML de SAS, par un statisticien s'est avérée nécessaire à certains moments.

H.1 SEUILS DE DÉTECTION DES ALARMES DE REcul

H.1.1 Plan expérimental

Le plan expérimental consiste en un devis mixte avec un facteur inter-sujets (2 niveaux de types de protecteurs auditifs – coquilles et bouchons) et des mesures répétées sur trois facteurs intrasujets, soit: 1) le type d'alarmes (3 niveaux – alarmes tonale, multi-tonale et large-bande), 2) les bruits (4 niveaux) et 3) le port de protecteurs auditifs (2 niveaux – sans et avec). Le facteur sujet est également considéré dans l'analyse, chaque participant étant modélisé comme un vecteur de 24 mesures.

H.1.2 Effet du type de protecteur (facteur inter-sujets)

Une comparaison de la matrice des variances-covariances des deux groupes de protecteurs a révélé des variances totales de 344,6 avec facteur ϵ de Box de 0,115 pour les coquilles et de 383,8 avec facteur ϵ de Box de 0,094 pour les bouchons (Box, 1953; Strivastava, 2005). Puisque ces statistiques sont semblables, il est raisonnable de supposer que les deux matrices des variances-covariances sont égales. La statistique de Dempster (1960), ajustée pour la non-sphéricité, a permis de comparer les 24 moyennes intrasujets du groupe coquilles à celles du groupe bouchons. Les résultats supportent l'énoncé que le type de protecteur n'a pas d'effet significatif sur les seuils de détection [$F(2,33; 55,92) = 0,736$]. Les données des deux groupes seront alors combinées en un seul groupe dans les analyses qui suivent.

H.1.3 Effets principaux et interactions (facteurs intrasujets)

Les données révèlent des effets significatifs [$\chi^2(3,054) = 10,913, p < 0,001$] et une décomposition des effets démontrent des effets principaux significatifs pour les facteurs alarmes [$\chi^2(1,431) = 12,978, p < 0,001$], bruit [$\chi^2(1,481) = 14,277, p < 0,001$] et port de protecteurs [$\chi^2(1) = 11,347, p = 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les facteurs alarmes et bruit [$\chi^2(2,083) = 14,408, p < 0,001$], entre les facteurs alarmes et port de protecteurs [$\chi^2(1,683) = 5,331, p = 0,008$], ainsi qu'une interaction significative entre les trois facteurs intrasujets [$\chi^2(5,583) = 2,385, p = 0,03$], pour un degré de signification de $\alpha = 0,05$.

Puisqu'une interaction entre les trois facteurs intrasujets existe, nous devons ajuster les niveaux des deux autres facteurs dans la description de chacun des effets principaux.

H.1.3.1 Effet principal du facteur alarme

Un diagramme de comparaisons (Figure 20) résume les résultats pour huit groupes de comparaisons possibles en fonction des combinaisons des niveaux des deux autres facteurs, parmi lesquelles des comparaisons entre les différentes alarmes peuvent être faites.

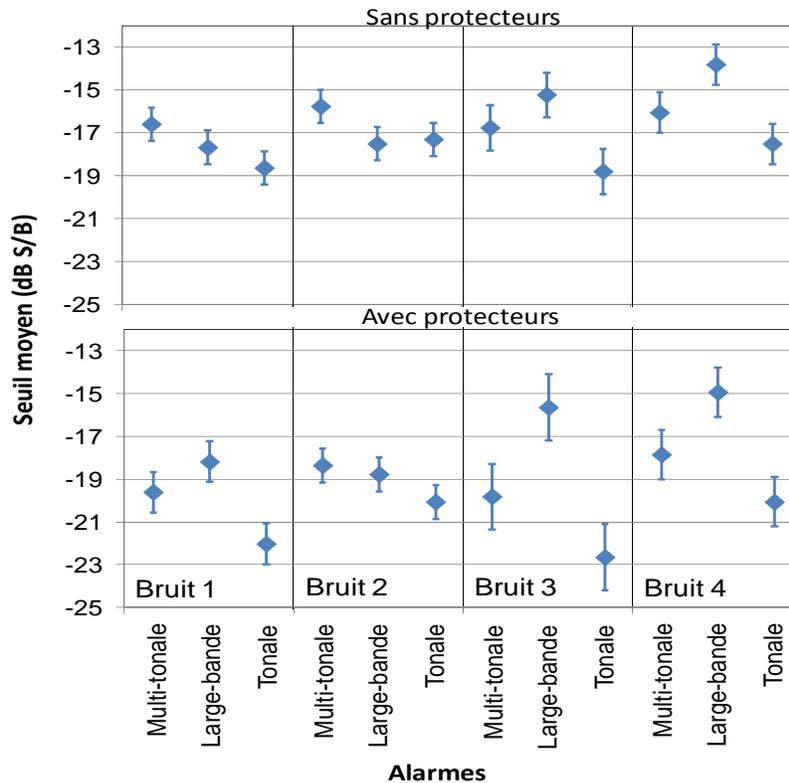


Figure 20 : Comparaison du seuil de détection moyen des alarmes en ajustant les niveaux des facteurs bruit et port de protecteurs (sans/avec protecteurs). Les barres d’erreur sont basées sur l’erreur maximale (+/- la moitié de l’erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour le bruit 1, sans protection auditive, le seuil de détection moyen est significativement plus élevé pour l’alarme multi-tonale que pour l’alarme tonale, alors que l’alarme large-bande est comparable aux deux autres alarmes. Lors du port des protecteurs, le seuil moyen est similaire pour les alarmes à trois composantes et large-bande, alors que le seuil de l’alarme tonale est significativement meilleur.

Dans le bruit 2, sans protection auditive, le seuil moyen est significativement plus élevé pour l’alarme multi-tonale que pour l’alarme large-bande, alors que l’alarme tonale est comparable aux deux autres alarmes. Lors du port des protecteurs, le seuil moyen est significativement plus élevé pour l’alarme multi-tonale que pour l’alarme tonale, alors que l’alarme large-bande est comparable aux deux autres alarmes.

Pour les bruits 3 et 4, on obtient des résultats similaires pour les alarmes multi-tonale et tonale, et un seuil moyen significativement plus élevé pour l’alarme large-bande que pour l’alarme tonale et ce, avec et sans protection auditive. À l’exception de la condition sans protection dans le

bruit 3, le seuil moyen pour l'alarme large-bande est aussi significativement supérieur à celui pour l'alarme multi-tonale.

Il est à noter que les différences significatives obtenues dans les bruits 1 et 2 sont relativement faibles, de l'ordre de 1 à 3,8 dB (le pas de mesure étant 2 dB), alors que celles obtenues dans les bruits 3 et 4 peuvent atteindre jusqu'à 7 dB (2,3 à 7 dB).

H.1.3.2 Effet principal du facteur bruit

Un diagramme de comparaisons est présenté à la Figure 21 pour regarder l'effet principal du facteur bruit.

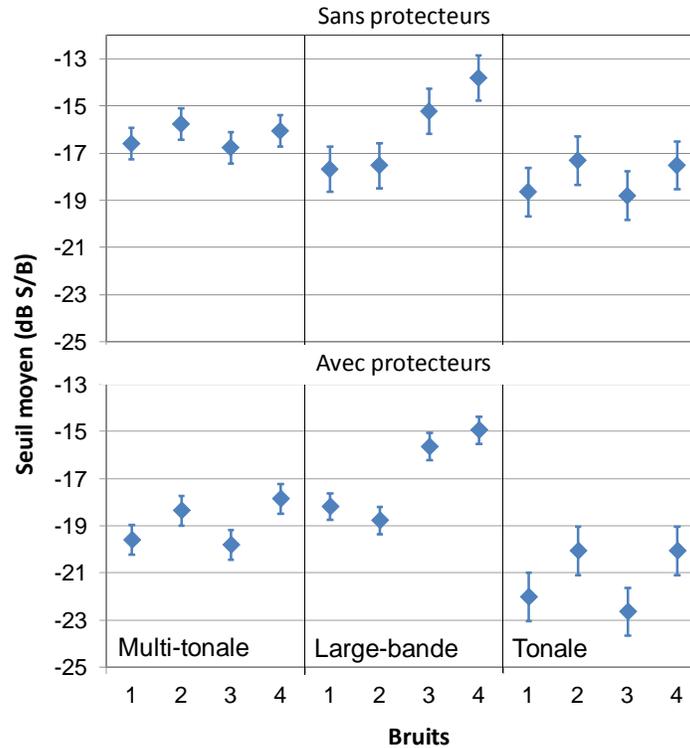


Figure 21 : Comparaison du seuil de détection moyen obtenu dans chacun des bruits en ajustant les niveaux des facteurs alarme et port de protecteurs (sans/avec protecteurs). Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour l'alarme multi-tonale, on ne note aucune différence significative dans les seuils moyens obtenus dans chacun des bruits, sans protection auditive. Par contre, avec les protecteurs auditifs, le seuil moyen est significativement plus élevé dans le bruit 4 que dans les bruits 1 et 3, et dans le bruit 2 comparativement au bruit 3.

Pour l'alarme large-bande, des tendances identiques sont notées avec et sans protecteurs auditifs. Les seuils moyens sont similaires dans les bruits 1 et 2 et dans les bruits 3 et 4, les seuils étant significativement plus élevés dans les bruits 3 et 4 que dans les bruits 1 et 2.

Finalement, sans protection auditive on ne note aucune différence significative dans les seuils moyens obtenus dans chacun des bruits avec l'alarme tonale. Par contre, avec les protecteurs

auditifs, le seuil moyen est significativement plus élevé dans le bruit 2 que dans le bruit 3, et dans le bruit 4 comparativement au bruit 3.

H.1.3.3 Effet principal du facteur port de protecteurs

Finalement, le diagramme de comparaisons pour investiguer l'effet du facteur port de protecteurs est disponible à la Figure 22.

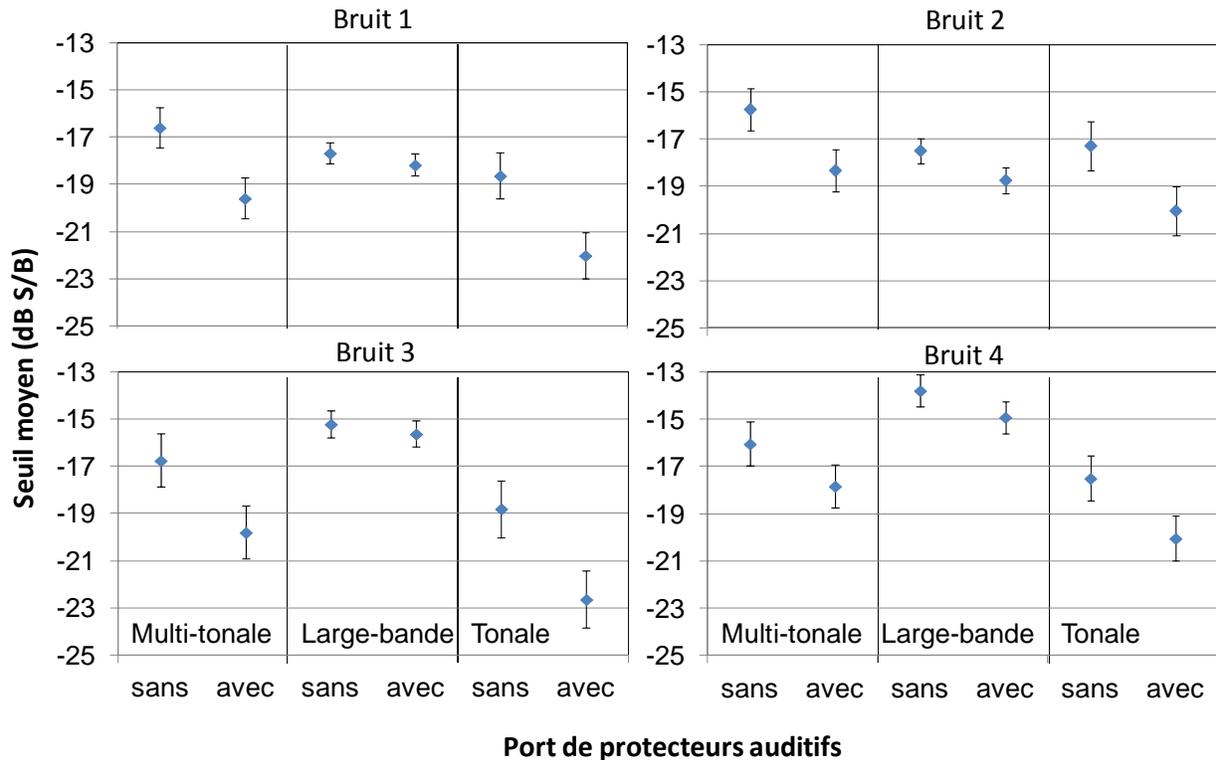


Figure 22 : Comparaison du seuil de détection moyen obtenu sans et avec protecteurs auditifs en ajustant les niveaux des facteurs alarme et bruit. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaison (chaque panneau individuel).

Pour l'alarme multi-tonale, le seuil moyen est significativement plus faible avec protecteurs que sans, à l'exception du bruit 4 pour lequel les deux seuils sont similaires. Pour sa part, la détection de l'alarme large-bande ne semble pas influencée par le port des protecteurs auditifs, à l'exception d'un seuil significativement plus élevé (différence de 1,3 dB) avec protecteurs comparativement à la condition sans protecteur dans le bruit 2. Cette différence est par ailleurs plus faible que le pas de mesure utilisé pour mesurer les seuils. Finalement, dans tous les bruits, le seuil moyen de l'alarme tonale est significativement plus faible lors du port de protecteurs auditifs comparativement à la condition sans protection.

H.2 ÉGALISATION DE LA SONIE

H.2.1 Plan expérimental

Le plan expérimental consiste en un devis mixte avec un facteur inter-sujets (2 niveaux de types de protecteurs auditifs – coquilles et bouchons) et des mesures répétées sur trois facteurs intrasujets, soit: 1) le type d'alarmes (2 niveaux – alarmes multi-tonale et large-bande), 2) le type de bruit (4 niveaux – bruits 1, 2, 3 et 4) et 3) le port de protecteurs auditifs (2 niveaux – sans et avec). Le facteur sujet est également considéré dans l'analyse, chaque participant étant modélisé comme un vecteur de 16 mesures. La mesure dépendante est la différence entre le niveau ajusté pour l'alarme en observation en comparaison avec le niveau de l'alarme tonale, qui sert de référence.

H.2.2 Effet du type de protecteur (facteur inter-sujets)

Une comparaison de la matrice des variances-covariances des deux groupes de protecteurs a révélé des variances similaires pour le groupe des coquilles (84,2 avec facteur ϵ de Box de 0,525) et le groupe des bouchons (120,5 avec facteur ϵ de Box de 0,417) (Box, 1953; Strivastava, 2005). Puisque ces statistiques sont semblables, il est raisonnable de supposer que les deux matrices des variances-covariances sont égales.

Une analyse de variance multi-variée a été utilisée afin de vérifier l'égalité des 16 moyennes du groupe coquilles à celles du groupe bouchons. Les résultats supportent l'énoncé que le type de protecteur n'a pas d'effet significatif sur la sonie [$\chi^2 (7,788) = 7,710, p=0,440$]. Les données des deux groupes seront alors combinées en un seul groupe dans les analyses qui suivent.

H.2.3 Effets principaux et interactions (facteurs intrasujets)

Les données révèlent des effets significatifs [$F (3,417) = 36,157, p<0,001$] et une décomposition des effets démontrent des effets principaux significatifs pour les facteurs alarme [$F (1,0) = 18,424, p<0,001$], bruit [$F (2,536) = 11,771, p=0,005$] et port de protecteurs [$F (1,0) = 11,451, p=0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les facteurs alarmes et bruit [$F (3,160) = 11,726, p=0,010$] et entre les facteurs alarmes et port de protecteurs [$F (1,0) = 4,102, p =0,043$], pour un degré de signification de $\alpha = 0.05$. Les données ne révèlent par contre aucune interaction significative entre les trois facteurs intrasujets.

H.2.3.1 Effet principal du facteur alarme

Puisqu'il y a des interactions significatives entre le facteur alarme et les deux autres facteurs intrasujets, il faut ajuster les niveaux de ces derniers dans l'analyse de l'effet du facteur alarme. On retrouve alors 8 groupes de comparaisons (voir Figure 23), pour lesquels les deux alarmes (multi-tonale et tonale) peuvent être comparées.

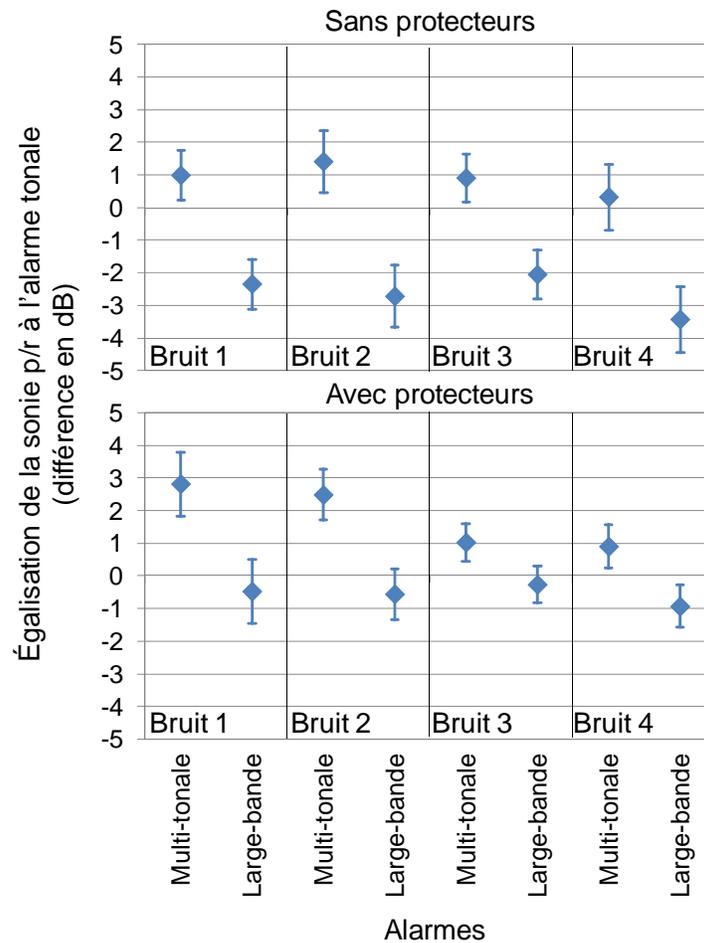


Figure 23 : Comparaison de l'égalisation de la sonie des alarmes multi-tonale et large-bande par rapport à l'alarme tonale – Évaluation du facteur alarme. L'axe des y représente la différence de niveau sonore entre l'alarme sous observation (soit l'alarme multi-tonale ou l'alarme large-bande) et l'alarme de référence (l'alarme tonale). Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Cette figure permet premièrement de constater que la différence est toujours positive dans le cas de l'alarme multi-tonale et négative pour l'alarme large-bande, peu importe le bruit et la condition du port de protecteurs auditifs (sans et avec). Ce constat indique que pour atteindre une sonie équivalente à celle de l'alarme tonale, le niveau sonore de l'alarme multi-tonale doit être ajusté à un niveau plus fort que celui de l'alarme tonale, alors que le niveau de l'alarme large-bande est pour sa part ajusté à un niveau plus faible. En d'autres mots, à même niveau sonore, la sonie de l'alarme large-bande est plus élevée que la sonie de l'alarme tonale, qui est plus élevée que la sonie de l'alarme multi-tonale. L'alarme multi-tonale doit être ajustée à un niveau de 0,3 à 1,4 dB plus fort que le niveau de l'alarme tonale sans protecteurs et à un niveau de 0,9 à 2,8 dB plus fort que le niveau de l'alarme tonale avec protecteurs pour atteindre la même sonie que l'alarme tonale. Dans le cas de l'alarme large-bande, elle peut être ajustée à un niveau de 2,0 à 3,4 dB plus faible sans protecteurs et à un niveau de 0,2 à 0,9 dB plus faible avec protecteurs pour que sa sonie soit comparable à celle de l'alarme tonale. La variable dépendante étant

justement la différence entre le niveau ajusté pour l'alarme en comparaison avec l'alarme tonale, des intervalles de confiance ont été construits à l'aide de la statistique de type ANOVA pour la moyenne de la différence en contrôlant pour les niveaux des trois facteurs. L'ajustement de Bonferroni a également été utilisé pour contrôler le niveau de confiance à 95%. Ces analyses démontrent une différence de niveau significative en comparaison avec l'alarme tonale pour l'alarme multi-tonale dans deux conditions sur 8 (Bruit 1 avec protecteurs et Bruit 2 avec protecteurs) et dans 4 conditions sur 8 pour l'alarme large-bande (soit dans tous les bruits, sans protecteurs auditifs). Il semble donc, du moins pour l'alarme large-bande, que l'avantage de cette dernière pour la sonie comparativement à l'alarme tonale s'estompe lors du port de protecteurs auditifs, les deux alarmes étant essentiellement jugées identiques.

La Figure 23 permet également de démontrer que les deux alarmes (multi-tonale et large-bande) sont différentes dans toutes les conditions lorsque l'on examine leurs différences. En effet, on ne note aucune interaction entre les barres d'erreur dans chacun des panneaux de la figure.

H.2.3.2 Effet principal du facteur bruit

Le facteur bruit interagit avec le facteur alarme. Il y a alors deux groupes de comparaison parmi lesquels 6 comparaisons sont possibles (Bruits 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4). Ces comparaisons sont illustrées à la Figure 24.

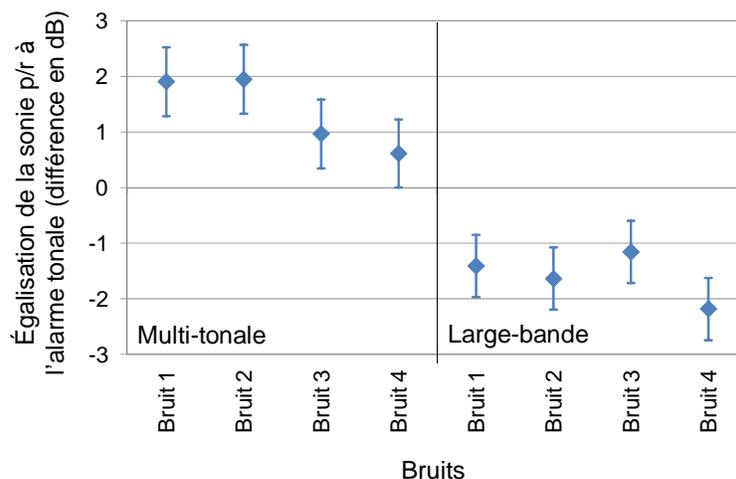


Figure 24 : Comparaison de l'égalisation de la sonie des alarmes multi-tonale et large-bande par rapport à l'alarme tonale – Évaluation du facteur bruit. L'axe des y représente la différence de niveau sonore entre l'alarme sous observation (soit l'alarme multi-tonale ou l'alarme large-bande) et l'alarme de référence (l'alarme tonale). Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Encore une fois, peu importe le bruit, on note clairement que l'alarme large-bande est ajustée à un niveau plus faible que l'alarme tonale, alors que l'alarme multi-tonale est ajustée à un niveau plus fort. Pour l'alarme multi-tonale, on note une différence significative entre les bruits 1 et 4 et entre les bruits 2 et 4, la différence dans le niveau sonore étant plus faible dans le bruit 4 que les

bruits 1 et 2. Pour l'alarme large-bande, on ne note aucune différence significative entre les divers bruits.

H.2.3.3 Effet principal du facteur port de protecteurs

Finalement, les données ont révélé une interaction significative entre les facteurs port de protecteurs et alarme. Afin de quantifier davantage l'effet du premier facteur, nous avons deux groupes de comparaisons possibles (voir Figure 25) pour lesquels nous pouvons comparer les différences entre chaque type d'alarme et l'alarme de référence obtenues sans protecteurs auditifs et avec protecteurs auditifs.

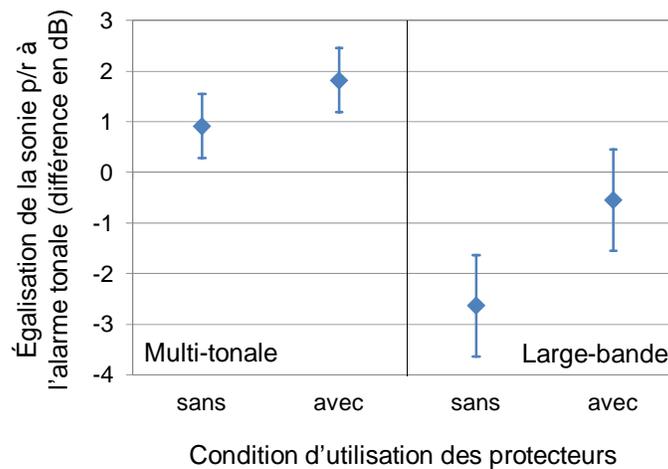


Figure 25 : Comparaison de l'égalisation de la sonie des alarmes multi-tonale et large-bande par rapport à l'alarme tonale – Évaluation du facteur port de protecteurs auditifs. L'axe des y représente la différence de niveau sonore entre l'alarme sous observation (soit l'alarme multi-tonale ou l'alarme large-bande) et l'alarme de référence (l'alarme tonale). Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour l'alarme multi-tonale, la comparaison entre les deux conditions du port de protecteurs auditifs (sans et avec) ne révèle aucune différence significative, alors que pour l'alarme large-bande, la différence dans le niveau sonore comparativement à l'alarme tonale est significativement plus importante sans protecteurs auditifs qu'avec les protecteurs auditifs. Tel que mentionné plus haut, il semble que l'avantage de l'alarme large-bande comparativement à l'alarme tonale en ce qui a trait à la sonie semble s'estomper lors du port de protection auditive.

H.3 ÉVALUATION DU DEGRÉ D'URGENCE

H.3.1 Plan expérimental

Le plan expérimental consiste en un devis mixte avec un facteur inter-sujets (2 niveaux de types de protecteurs auditifs – coquilles et bouchons) et des mesures répétées sur quatre facteurs intrasujets, soit: 1) le type d'alarme (3 niveaux – alarmes tonale, multi-tonale et large-bande) ; 2) le type de bruit (4 niveaux – bruits 1, 2, 3 et 4) ; 3) le niveau de présentation des alarmes (3 niveaux – rapports S/B de -6, 0 et +6) ; 4) le port de protecteurs auditifs (2 niveaux – sans et

avec). Le facteur sujet est également considéré dans l'analyse, chaque participant étant modélisé comme un vecteur de 72 mesures.

H.3.2 Effet du type de protecteur (facteur inter-sujets)

Une comparaison de la matrice des variances-covariances des deux groupes de protecteurs a révélé des variances totales différentes pour le groupe des coquilles (24 244,4 avec facteur ϵ de Box de 0,095) et pour le groupe des bouchons (20 745,1 avec facteur ϵ de Box de 0,293) (Box, 1953; Strivastava, 2005). Puisque ces statistiques ne sont pas semblables, il n'est pas raisonnable de supposer que les deux matrices des variances-covariances sont égales. De plus, le test de sphéricité de Strivastava (2005) pour les données hautement dimensionnelles avec une transformation de Helmert indique que les composantes orthogonales ne sont pas sphériques ($1/\epsilon = 2,08$, $p < 0,001$ pour les coquilles et $1/\epsilon = 2,62$, $p < 0,001$ pour les bouchons). Les conditions d'application d'une analyse uni-variée de type ANOVA ne sont alors pas satisfaites. Ainsi, des analyses basées sur la statistique du type ANOVA pour les données hautement dimensionnelles (Ahmad et coll. 2008) seront utilisées.

Afin de vérifier l'égalité des moyennes pour les deux groupes (bouchons et coquilles), la statistique de type ANOVA qui ne nécessite pas l'égalité des matrices a été utilisée. Les résultats ne semblent pas révéler une différence significative entre les coquilles et les bouchons [$\chi^2(12,257) = 10,864$, $p = 0,562$]. Par contre, la variabilité dans les données est très élevée et puisque les matrices des variances-covariances ne sont pas égales, deux analyses séparées doivent être menées, soit une pour les coquilles et l'autre pour les bouchons.

H.3.3 Effets principaux et interactions (facteurs intrasujets)

Les données révèlent des effets significatifs dans le cas des coquilles [$F(1,757) = 15,880$, $p < 0,001$] et des bouchons [$F(2,124) = 17,423$, $p < 0,001$]. Lors de la décomposition des effets, l'inégalité de Kimball a été utilisée pour contrôler l'erreur des tests indépendants. Dans les analyses qui suivent, les interactions d'ordre 2 et d'ordre 3 sont ainsi considérées significatives lorsque la valeur p est inférieure à 0,0085 et 0,017, respectivement.

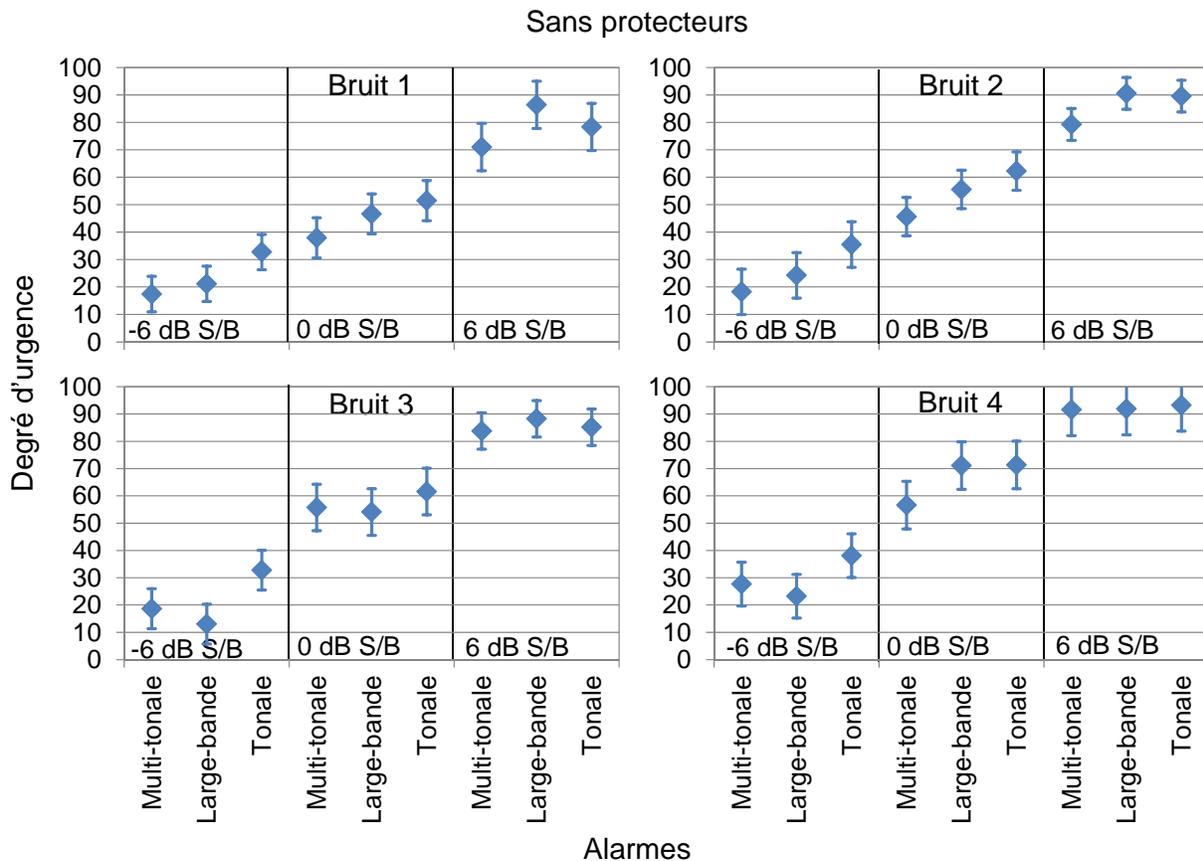
Une décomposition des effets démontre des effets principaux significatifs pour les facteurs alarme [$F(2,071) = 13,025$, $p = 0,002$], bruit [$F(2,360) = 10,535$, $p = 0,008$], port de protecteurs [$F(1,0) = 10,053$, $p = 0,002$] et niveau de présentation [$F(1,026) = 11,725$, $p = 0,001$], des interactions d'ordre 2 entre le facteur alarme et le facteur bruit [$F(5,327) = 20,389$, $p = 0,001$], entre les facteurs alarme et niveau de présentation [$F(3,550) = 15,900$, $p = 0,002$] et entre les facteurs port de protecteurs et niveau de présentation [$F(1,999) = 11,705$, $p = 0,003$], ainsi qu'une interaction significative d'ordre 3 entre les facteurs alarme, port de protecteurs et niveau de présentation [$F(5,065) = 14,442$, $p = 0,014$].

Dans le cas des bouchons, les analyses ont révélé un nombre moins important d'effets et d'interactions significatives. On note des effets principaux significatifs pour les facteurs bruit [$F(1,951) = 11,961$, $p = 0,002$], port de protecteurs [$F(1,0) = 7,393$, $p = 0,007$] et niveau de présentation [$F(1,017) = 11,466$, $p = 0,001$], ainsi qu'une interaction significative d'ordre 2 entre les facteurs alarmes et port de protecteurs [$F(1,689) = 9,026$, $p = 0,008$]. Puisque la valeur P est proche de 0,0085, nous allons également considérer l'interaction entre les facteurs port de protecteurs et niveau de présentation [$F(1,438) = 8,156$, $p = 0,009$].

H.3.3.1 Effet du facteur alarme - coquilles

Puisque des interactions existent entre le facteur alarme et les autres facteurs intrasujets, nous devons ajuster les niveaux des autres facteurs dans la description de l'effet principal du facteur Alarme. Il y a alors 24 groupes de comparaisons possibles, dans lesquels les trois alarmes sont comparées (multi-tonale contre large-bande, multi-tonale contre tonale et large-bande contre tonale), pour un total de 72 comparaisons.

Les diagrammes de comparaisons sont retrouvés à la Figure 26. Les données obtenues sans coquilles sont retrouvées dans la portion du haut alors que celles avec coquilles apparaissent au bas de la figure.



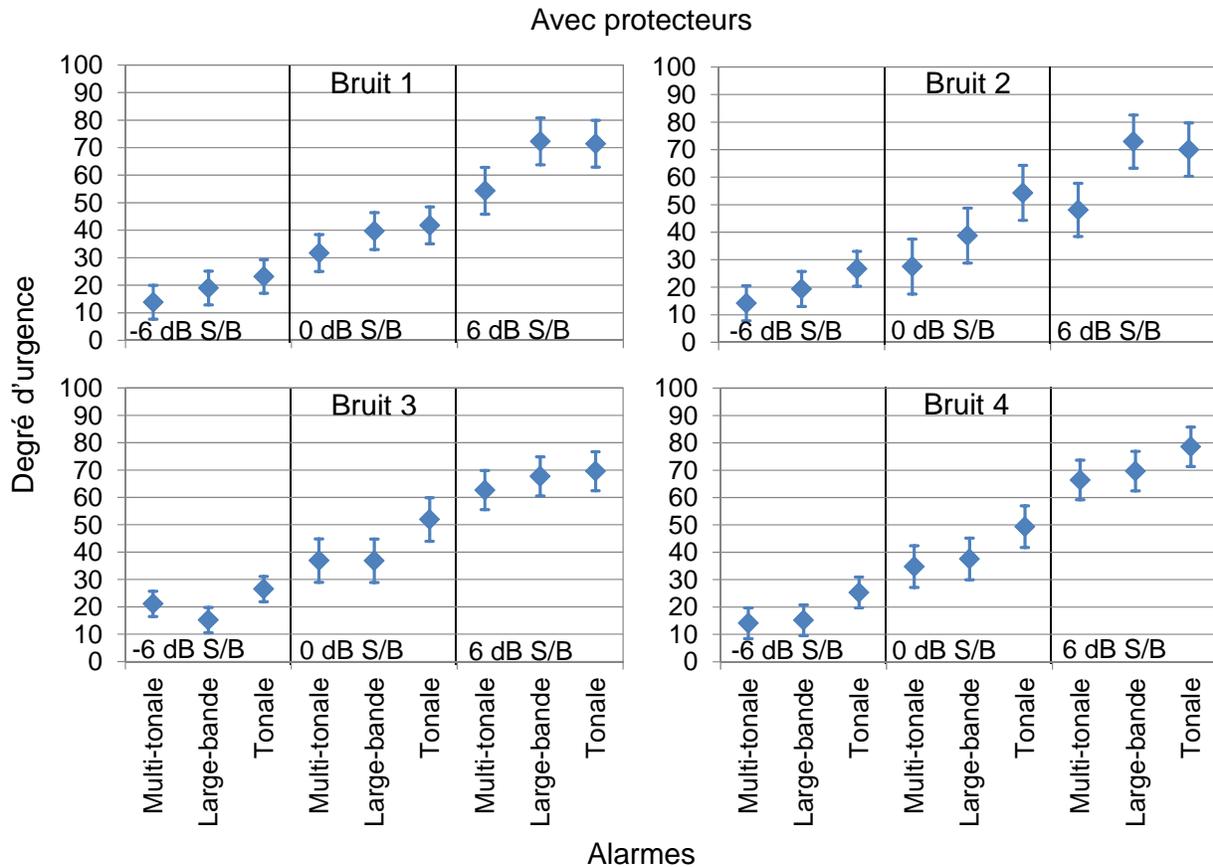


Figure 26 : Comparaison du niveau moyen d'urgence évoqué par les trois différentes alarmes de recul chez les participants du groupe des coquilles, en ajustant les niveaux du facteur port de protecteurs. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel). La portion du haut illustre les données sans coquilles alors que celle du bas représente les données avec coquilles.

Dans la Figure 26, on note une augmentation du degré d'urgence perçu par les participants en fonction du niveau de présentation avec et sans protection auditive. Puisqu'il est bien connu que le niveau sonore a un impact important sur l'urgence perçue d'un signal, ce résultat était attendu. L'effet du niveau sera examiné plus en détail dans une section ultérieure. En ce qui concerne le facteur alarme, chacune des alarmes est comparée aux deux autres alarmes un total de 24 fois. En général, dans des conditions expérimentales équivalentes, l'alarme tonale est toujours jugée plus urgente que l'alarme multi-tonale, avec des différences allant de 1,4 à 26,8 dans le degré moyen d'urgence perçue. L'alarme tonale est également jugée plus urgente que l'alarme large-bande dans 19 des 24 comparaisons entre ces deux types d'alarme et les différences varient entre 0,3 et 19,8. Finalement, l'alarme large-bande est jugée plus urgente que l'alarme multi-tonale dans 19 des 24 comparaisons possibles; les différences obtenues entre ces deux types fluctuent entre 0,1 et 24,8.

La plupart de ces différences ne sont toutefois pas statistiquement significatives. En effet, la variabilité dans les résultats est assez élevée, de sorte que dans plusieurs cas l'erreur maximale au sein d'un groupe de comparaison dépasse largement les différences obtenues entre les

alarmes. Par contre, quelques différences ont tout de même atteint le seuil de signification statistique (voir Tableau 6).

Tableau 6 : Différences significatives obtenues lors de la comparaison du degré moyen d'urgence évoqué par les différentes alarmes de recul.

Bruit	Condition de protection	Niveau de présentation	Alarmes comparées	Différence obtenue
Bruit 1	Sans coquilles	-6 dB S/B	Tonale > Multi-tonale	15,3
	Avec coquilles	6 dB S/B	Tonale > Multi-tonale	17,1
			Large-bande > Multi-tonale	17,9
Bruit 2	Sans coquilles	-6 dB S/B	Tonale > Multi-tonale	17,3
		0 dB S/B	Tonale > Multi-tonale	16,6
	Avec coquilles	0 dB S/B	Tonale > Multi-tonale	26,8
		6 dB S/B	Tonale > Multi-tonale	21,9
		6 dB S/B	Large-bande > Multi-tonale	24,8
Bruit 3	Sans coquilles	-6 dB S/B	Tonale > Large-bande	19,8
	Avec coquilles	-6 dB S/B	Tonale > Large-bande	11,3

On note que seulement 10 des 72 comparaisons possibles se sont avérées statistiquement significatives, la moitié de celles-ci ayant été obtenues dans le bruit 2. En général, on note que les différences significatives révèlent un degré moyen d'urgence plus élevé pour l'alarme tonale que l'alarme multi-tonale (6 des 10 différences significatives), pour l'alarme large-bande que pour l'alarme-multi-tonale et pour l'alarme tonale comparativement à l'alarme large-bande. Quoique les différences ne soient pas significatives pour toutes les comparaisons possibles, les données semblent suivre les mêmes tendances que les observations rapportées au Tableau 6.

H.3.3.2 Effet du facteur alarme – bouchons

Puisque le facteur alarme interagit avec le facteur port de protecteurs auditifs, on retrouve deux groupes de comparaisons à la Figure 27 afin de décrire l'effet des divers types d'alarme, dans lesquels les trois alarmes sont comparées (multi-tonale contre large-bande, multi-tonale contre tonale et large-bande contre tonale). La variabilité dans les résultats est par contre tellement élevée que l'erreur maximale dans chaque groupe de comparaison dépasse les différences obtenues entre les diverses alarmes (entre 2,1 et 13,4) et aucune des 6 comparaisons possibles n'atteint le seuil de signification statistique.

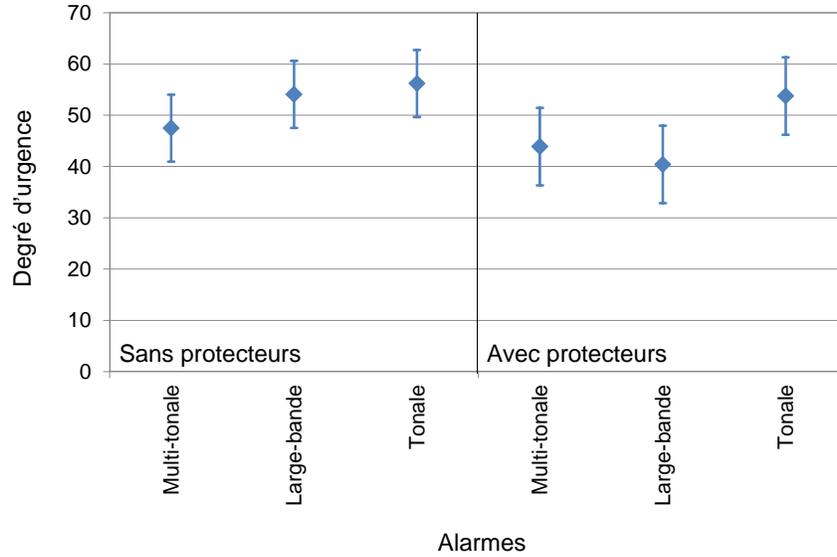


Figure 27 : Comparaison du niveau moyen d’urgence évoqué par les trois différentes alarmes de recul chez les participants du groupe des bouchons, en ajustant les niveaux du facteur port de protecteurs. Les barres d’erreur sont basées sur l’erreur maximale (+/- la moitié de l’erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

H.3.3.3 Effet du facteur bruit – coquilles

Dans le cas des coquilles, le facteur bruit interagit avec le facteur alarme. On retrouve alors trois groupes de comparaisons (voir Figure 28), pour lesquels 6 comparaisons sont possibles entre les bruits (1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 et 3-4), pour un total de 18 comparaisons.

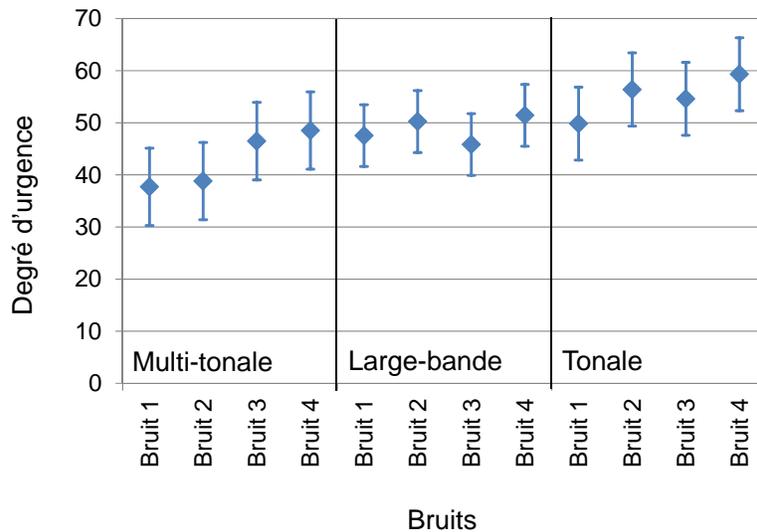


Figure 28 : Comparaison du niveau moyen d’urgence évoqué dans les quatre bruits en fonction du type d’alarme pour le groupe des coquilles. Les barres d’erreur sont basées sur l’erreur maximale (+/- la moitié de l’erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour chacune des alarmes, les données ne révèlent aucune différence significative dans le degré moyen d'urgence perçu entre les divers bruits. Encore une fois, la variabilité dans les données est trop élevée pour identifier les différences significatives; l'erreur maximale au sein de chaque groupe de comparaisons excède clairement les différences notées. En général, on note des différences de 1,8 à 9,5 entre les divers bruits pour l'alarme tonale et entre 1,1 et 10,8 pour l'alarme multi-tonale, la plus grande différence étant notée dans les deux cas entre les bruits 1 et 4, quoique cette différence ne soit pas statistiquement significative. Finalement, le degré d'urgence moyen semble moins varier entre les divers bruits pour l'alarme large-bande, les différences étant de l'ordre de 1,2 à 5,6.

H.3.3.4 Effet du facteur bruit – bouchons

Puisque le facteur bruit n'interagit pas avec les autres facteurs intra-sujets, il y a seulement un groupe de comparaison, tel que retrouvé à la Figure 29, avec 6 combinaisons possibles des divers bruits.

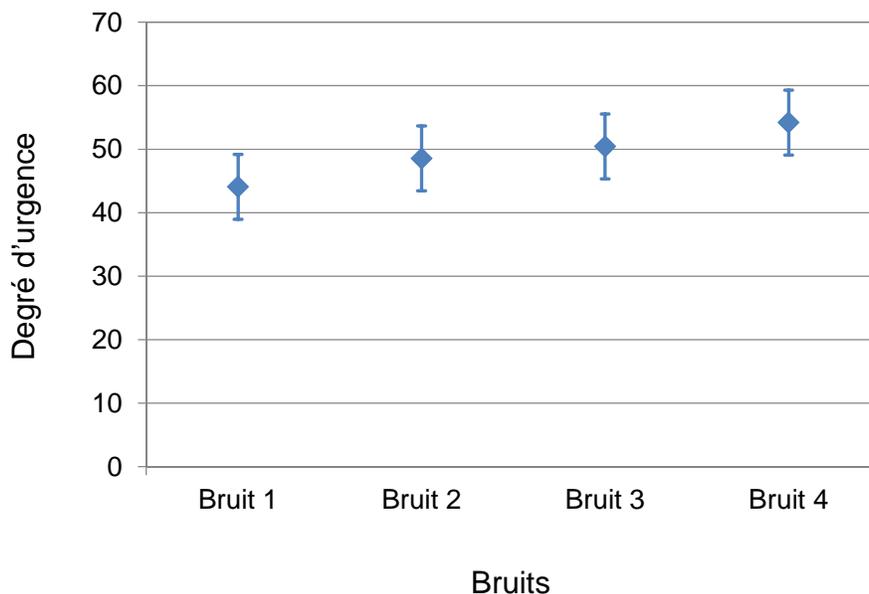


Figure 29 : Comparaison du niveau moyen d'urgence évoqué par les alarmes dans les quatre bruits pour le groupe des bouchons. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans ce groupe de comparaisons.

Malgré un effet principal significatif du facteur bruit, la variabilité élevée au sein des données limite l'identification des différences significatives entre les divers bruits. Les différences sont par ailleurs relativement faibles pour les 6 comparaisons possibles (de 1,9 à 10,1). À un niveau de confiance de 95% (tel qu'illustré à la Figure 29), aucune différence entre les divers bruits ne s'est avérée significative. Par ailleurs, avec un niveau de signification moins strict (90 %), le degré d'urgence moyen est significativement plus élevé dans le bruit 4 que dans le bruit 1, avec une différence de 10,1.

H.3.3.5 Effet du facteur port de protecteurs

Pour le groupe des coquilles et celui des bouchons, on note des interactions du facteur port de protecteurs avec les facteurs alarme et niveau. Dans chaque cas, on retrouve alors 9 groupes de comparaisons, pour lesquels le degré moyen d'urgence sans protection est comparé à celui avec protection. La Figure 30 (coquilles) et la Figure 31 (bouchons) illustrent les données.

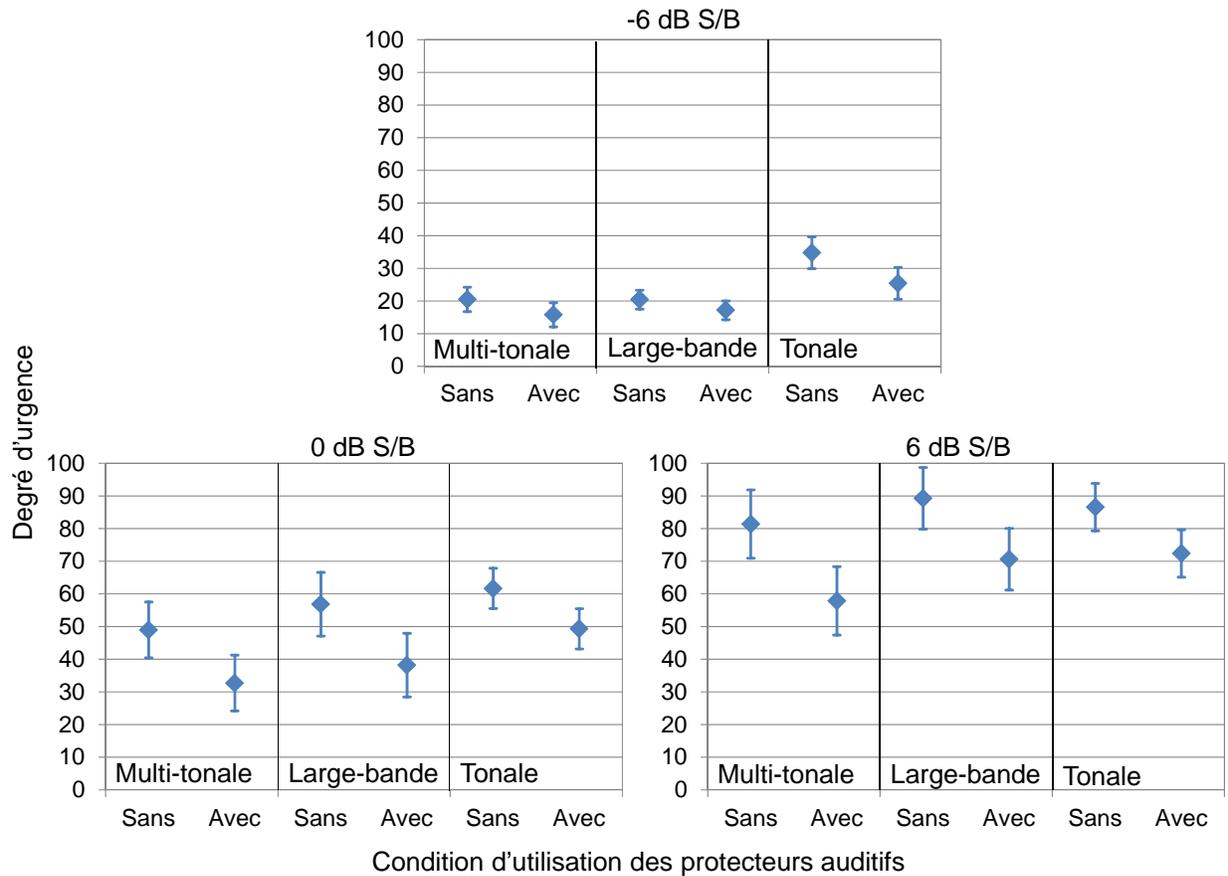


Figure 30 : Comparaison du degré moyen d'urgence sans et avec coquilles en ajustant pour les niveaux des facteurs alarme et niveau de présentation. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour le groupe des coquilles, les différences entre le degré moyen perçu sans protection auditive et celui avec les coquilles varient entre 3,3 et 23,5, et les neuf comparaisons vont dans le même sens, c'est-à-dire un degré d'urgence plus élevé sans protection auditive qu'avec les coquilles. Malgré cette tendance, seulement deux différences se sont révélées statistiquement significatives, soit dans les deux conditions suivantes: 1) alarme tonale présentée à 0 dB S/B (niveau moyen) et 2) alarme multi-tonale présentée à -6 dB S/B (faible niveau). Par contre, il est important de mentionner que 5 autres comparaisons sont associées à des valeurs P qui approchent la valeur 0,05 (entre 0,056 et 0,07).

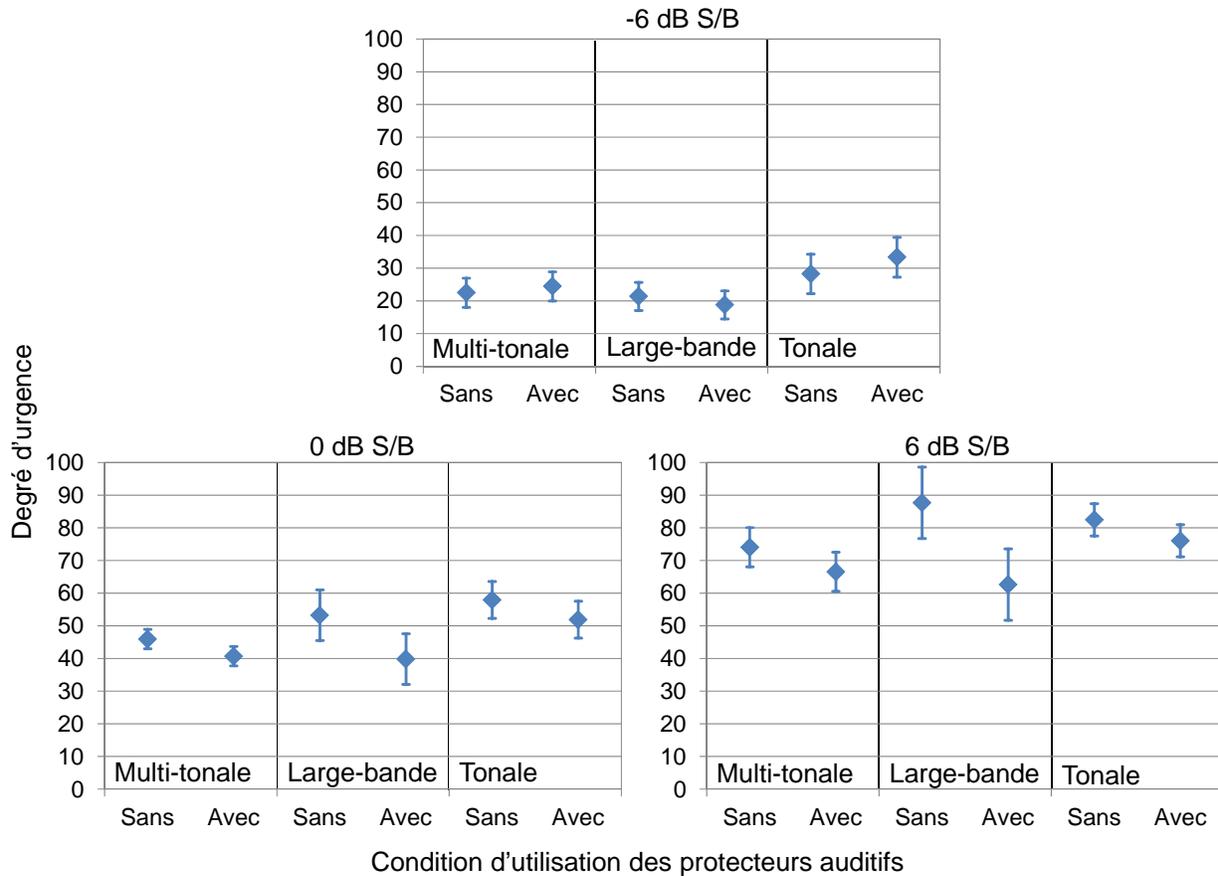


Figure 31 : Comparaison du degré moyen d’urgence sans et avec bouchons en ajustant pour les niveaux des facteurs alarme et niveau de présentation. Les barres d’erreur sont basées sur l’erreur maximale (+/- la moitié de l’erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Dans le cas des bouchons, la seule différence significative est notée pour l’alarme large-bande présentée au plus haut niveau (6 dB S/B), condition dans laquelle on note un degré moyen d’urgence significativement plus élevé sans protection qu’avec les bouchons. Comme c’est généralement le cas pour les analyses des données de l’expérience portant sur l’urgence, la variabilité élevée dans les données rend difficile l’identification de différences qui atteignent un niveau de signification sur le plan statistique. De façon plus descriptive, les différences avec et sans bouchons varient entre 1,9 et 25,0 et dans 7 des 9 comparaisons effectuées, le degré d’urgence moyen est plus élevé sans protection que lors du port des bouchons.

H.3.3.6 Effet du niveau de présentation – coquilles

Pour les coquilles, on retrouve 6 groupes de comparaisons (voir Figure 32) pour lesquels les trois niveaux de présentation peuvent être comparés, puisque le facteur niveau interagit avec les facteurs alarme et port de protecteurs auditifs.

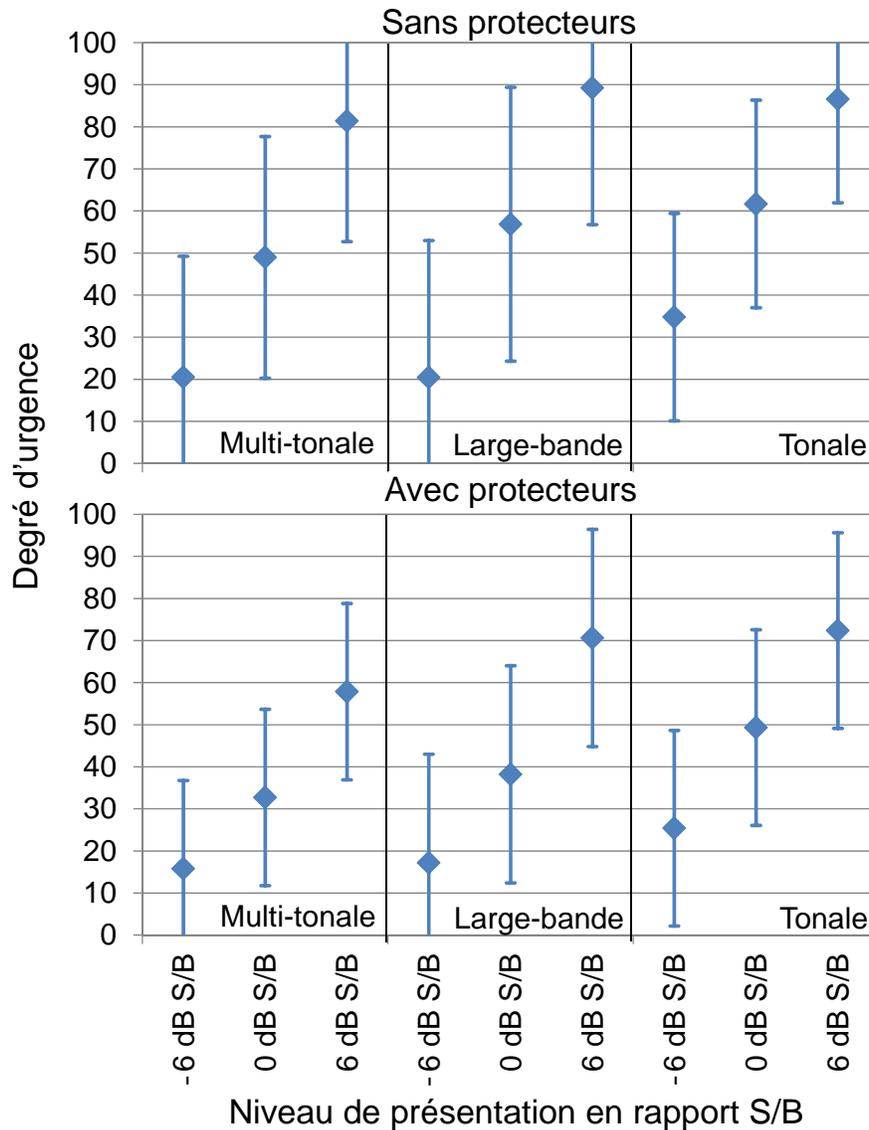


Figure 32 : Comparaison du degré moyen d'urgence perçu pour trois niveaux de présentation en ajustant pour le facteur port de protecteurs auditifs pour le groupe des coquilles. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Avec et sans coquilles, le degré d'urgence perçu semble augmenter en fonction du niveau de présentation, peu importe l'alarme présentée. Par contre, en raison de la variabilité élevée des résultats, seuls les deux niveaux extrêmes (-6 dB S/B et 6 dB S/B) sont statistiquement différents dans les 6 groupes de comparaisons (avec des différences de l'ordre de 42,1 à 68,9 unités entre le niveau le plus faible de présentation et celui le plus élevé). De façon générale, sans protection auditive, le degré d'urgence augmente d'environ 25-35 unités pour chaque augmentation de 6 dB dans le rapport S/B. Avec les coquilles, le degré d'urgence augmente d'environ 17-30 unités pour des changements similaires dans le niveau de présentation. Par ailleurs, le degré d'urgence

de l'alarme large-bande semble augmenter plus rapidement en fonction du niveau de présentation que les deux autres types d'alarmes dans certains cas (voir Tableau 7). Quoique cet énoncé n'ait pas été vérifié statistiquement, il serait probablement difficile de le démontrer étant donné la variabilité élevée des résultats.

Tableau 7 : Augmentation du degré d'urgence en fonction du niveau de présentation avec les coquilles.

Alarme	Sans coquilles		Avec coquilles	
	Différence entre -6 et 0 dB S/B	Différence entre 0 et 6 dB S/B	Différence entre -6 et 0 dB S/B	Différence entre 0 et 6 dB S/B
Multi-tonale	28,5	32,4	16,9	25,2
Large-bande	36,4	32,4	21,0	32,4
Tonale	26,9	24,9	23,9	23,1

H.3.3.7 Effet du niveau de présentation – bouchons

Puisque le facteur niveau de présentation interagit avec le facteur port de protecteurs auditifs, on retrouve deux groupes de comparaisons à la Figure 33 dans lesquels les trois niveaux sont comparés (-6 dB S/B contre 0 dB S/B, -6 dB S/B contre 6 dB S/B et 0 dB S/B contre 6 dB S/B).

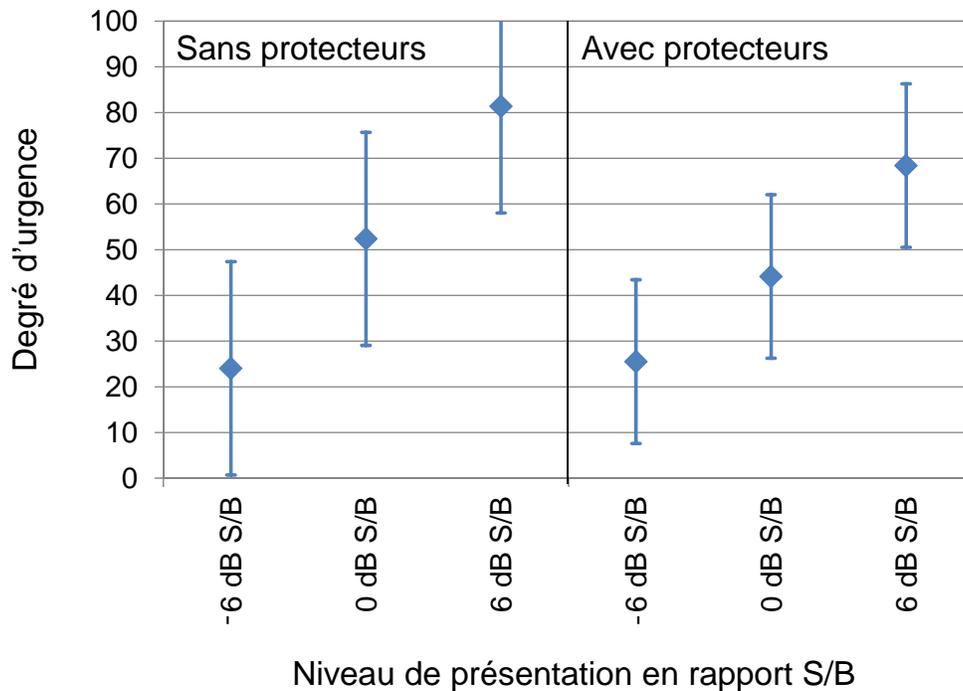


Figure 33 : Comparaison du degré moyen d'urgence perçue pour trois niveaux de présentation en ajustant pour le facteur port de protecteurs auditifs pour le groupe des bouchons. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Avec et sans bouchons, on note toujours une augmentation du degré d'urgence perçu en fonction du niveau de présentation, un résultat attendu. Par contre, en raison de la variabilité élevée des résultats, seuls les deux niveaux extrêmes (-6 dB S/B et 6 dB S/B) sont statistiquement différents dans les deux groupes de comparaisons (différence de 57,4 sans bouchons et de 42,9 avec bouchons). De façon générale, sans protection auditive, le degré d'urgence augmente d'environ 30 unités pour chaque augmentation de 6 dB dans le rapport S/B. Avec les bouchons, le degré d'urgence augmente d'environ 20 unités pour des changements similaires dans le niveau de présentation (18,6 unités en passant du faible niveau au moyen et 24,3 unités en passant du niveau moyen au niveau élevé) (voir Tableau 8).

Tableau 8 : Augmentation du degré d'urgence en fonction du niveau de présentation avec les bouchons.

Sans bouchons		Avec bouchons	
Différence entre -6 et 0 dB S/B	Différence entre 0 et 6 dB S/B	Différence entre -6 et 0 dB S/B	Différence entre 0 et 6 dB S/B
28,3	29,0	18,6	24,3

H.4 LOCALISATION AUDITIVE

H.4.1 Plan expérimental

Le plan expérimental consiste en un devis mixte avec un facteur inter-sujets (2 niveaux de types de protecteurs auditifs – coquilles et bouchons) et des mesures répétées sur trois facteurs intrasujets, soit: 1) le type d'alarmes (3 niveaux – alarme conventionnelle tonale, alarme à trois composantes et alarme large-bande), 2) la condition d'arrangement des haut-parleurs (3 niveaux – arrière, droit et gauche) et 3) le port de protecteurs auditifs (2 niveaux – sans et avec). Le facteur sujet est également considéré dans l'analyse, chaque participant étant modélisé comme un vecteur de 18 mesures.

H.4.2 Effet du type de protecteur (facteur inter-sujets)

Une comparaison de la matrice des variances-covariances des deux groupes de protecteurs a révélé des variances totales différentes pour le pourcentage de confusions (22,8 avec facteur ϵ de Box de 0,616 pour les coquilles et 11,1 avec facteur ϵ de Box de 0,956 pour les bouchons) et pour l'erreur angulaire (2150,2 avec facteur ϵ de Box de 0,587 pour les coquilles et 943,41 avec facteur ϵ de Box de 0,931 pour les bouchons) (Box, 1953; Strivastava, 2005). Puisque ces statistiques ne sont pas semblables dans le cas du pourcentage de confusions et dans le cas de l'erreur angulaire, il n'est pas raisonnable de supposer que les deux matrices des variances-covariances soient égales. Afin de vérifier l'égalité des moyennes pour les deux groupes (bouchons et coquilles), la statistique de type ANOVA qui ne nécessite pas l'égalité des matrices a été utilisée. Les résultats supportent l'énoncé que le type de protecteur semblent avoir un effet significatif sur le pourcentage de confusions [$\chi^2(5,821) = 24,175, p < 0,001$] et sur l'erreur angulaire [$\chi^2(4,899) = 22,068, p < 0,001$]. Les données des deux groupes ne peuvent donc pas être combinées en un seul groupe dans les analyses qui suivent.

La statistique de type ANOVA a été utilisée pour comparer les 18 moyennes intrasujets du groupe coquilles aux 18 moyennes du groupe bouchons. Puisque les estimations ne sont pas

assez précises pour décrire les différences significatives en utilisant des familles de comparaisons deux à deux, 18 tests de Student pour l'égalité des moyennes ont été utilisés. Sans protection auditive, les données ne révèlent aucune différence significative entre les groupes coquilles et bouchons, à l'exception de deux conditions pour le pourcentage de confusion et d'une condition pour l'erreur angulaire, soit: 1) alarme à large-bande de fréquences avec haut-parleurs à gauche (différence = 5,2%), 2) alarme tonale avec haut-parleurs à gauche (différence = 8,3%) et 3) alarme multi-tonale avec haut-parleurs derrière (différence de 3 degrés). Un tel résultat était prévisible et permet de démontrer que les deux groupes de 12 participants ont à la base des performances similaires dans presque toutes les conditions expérimentales. Avec protecteurs auditifs, des différences significatives sont notées pour toutes les conditions expérimentales, à l'exception des conditions suivantes: alarme à large bande de fréquences avec haut-parleurs derrière pour le pourcentage de confusion et alarme tonale avec haut-parleurs à la droite pour le pourcentage de confusion et pour l'erreur angulaire. Outre ces conditions, le pourcentage de confusion et l'erreur angulaire sont toujours plus élevés (moins bonnes performances) pour le groupe coquilles que pour le groupe bouchons lors de la localisation des alarmes de recul avec des protecteurs auditifs.

Puisque les 18 moyennes intrasujets du groupe coquilles ne sont pas égales à celles du groupe bouchons, nous devons faire des analyses séparées pour les deux types de protecteurs auditifs.

H.4.3 Effets principaux et interactions (facteurs intrasujets)

Pour le groupe des coquilles, les données révèlent des effets significatifs pour le pourcentage de confusion [F (1,584) = 14,938, $p < 0,001$] et pour l'erreur angulaire [F (1,693) = 15,116, $p < 0,001$]. Une décomposition des effets démontrent des effets principaux significatifs pour les facteurs alarmes [F (1,190) = 11,752, $p = 0,001$; F (1,311) = 12,202, $p = 0,001$], arrangement des haut-parleurs [F (1,112) = 12,295, $p = 0,001$; F (1,185) = 12,598, $p = 0,001$] et port de protecteurs [F (1,0) = 9,001, $p = 0,003$; F (1) = 8,684, $p = 0,003$], ainsi qu'une interaction significative entre les facteurs alarmes et arrangement [F (2,295) = 16,016, $p < 0,001$; F (2,724) = 16,081, $p = 0,001$], entre les facteurs alarmes et port de protecteurs [F (2,315) = 8,536, $p = 0,020$; F (1,980) = 11,017, $p = 0,004$], entre les facteurs arrangements des haut-parleurs et port de protecteurs [F (1,976) = 8,922, $p = 0,011$; F (2,001) = 6,338, $p = 0,042$] ainsi qu'une interaction significative entre les trois facteurs intrasujets [F (2,217) = 15,081, $p = 0,001$; F (3,605) = 18,809, $p = 0,001$], pour un degré de signification de $\alpha = 0,05$.

Pour le groupe des bouchons, les données révèlent également des effets significatifs pour le pourcentage de confusions [F (1,438) = 14,486, $p < 0,001$] et pour l'erreur angulaire [F (1,493) = 14,682, $p < 0,001$]. Une décomposition des effets démontrent des effets principaux significatifs pour les facteurs alarmes [F (1,162) = 12,221, $p = 0,001$; F (1,109) = 12,143, $p = 0,001$] et arrangement des haut-parleurs [F (1,055) = 12,293, $p < 0,001$; F (1,069) = 12,197, $p = 0,001$], ainsi qu'une interaction significative entre les facteurs alarmes et arrangement [F (1,743) = 14,955, $p < 0,001$; F (2,080) = 15,099, $p = 0,001$], pour un degré de signification de $\alpha = 0,05$. D'autre part, il ne semble pas y avoir d'effet significatif du port de protecteurs auditifs (sans et avec) [F (1,0) = 3,540, $p = 0,06$; F (1,0) = 2,600, $p = 0,107$], les pourcentages de confusion et l'erreur angulaire étant similaires avec et sans protecteurs auditifs.

H.4.3.1 Effet principal du facteur alarme - coquilles

Puisqu’une interaction entre les trois facteurs intrasujets existe, nous devons ajuster les niveaux des deux autres facteurs dans la description de chacun des effets principaux. Un diagramme de comparaison (Figure 34) résume les résultats pour six groupes de comparaisons possibles en fonction des combinaisons des niveaux des deux autres facteurs, parmi lesquels des comparaisons entre les différentes alarmes peuvent être faites. Encore une fois, la statistique de type ANOVA de Ahmad et coll. (2008) a été utilisée pour estimer conjointement les différences entre les pourcentages moyens, avec un ajustement de Bonferroni pour contrôler le niveau de confiance des six groupes de comparaison.

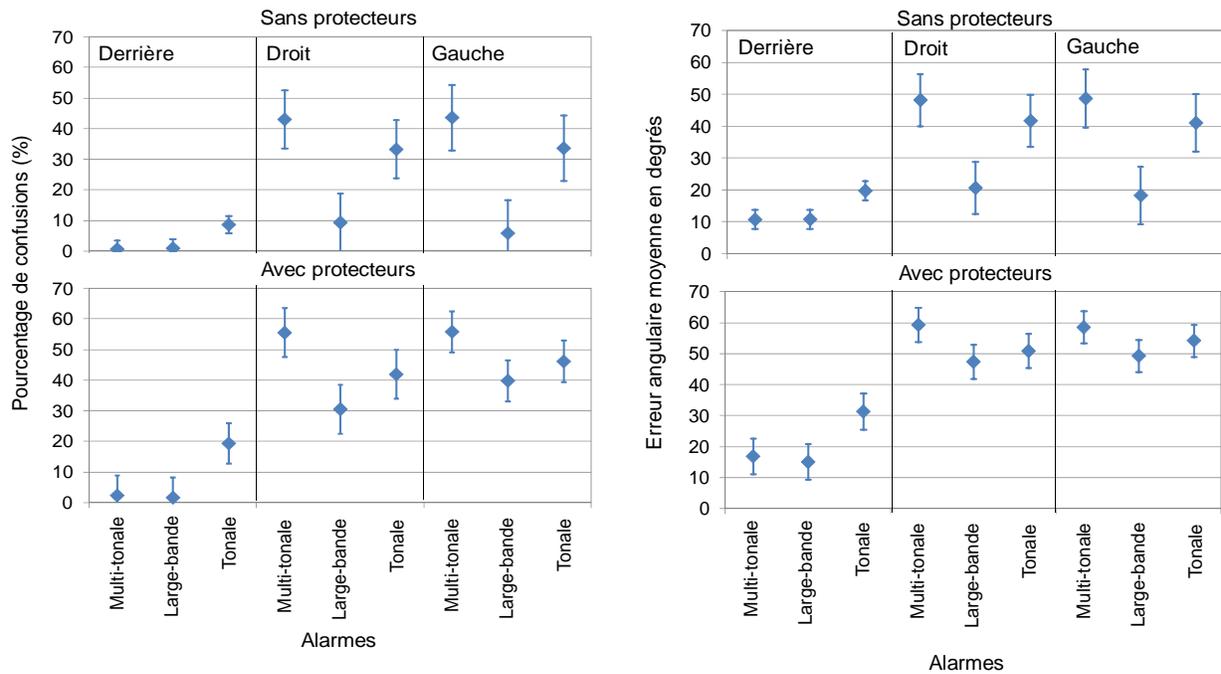


Figure 34 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l’erreur angulaire moyenne (figure de droite) des alarmes pour le groupe des coquilles en ajustant les niveaux des facteurs arrangement des haut-parleurs et port de protecteurs. Les barres d’erreur sont basées sur l’erreur maximale (+/- la moitié de l’erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour la condition avec les haut-parleurs derrière, le pourcentage de confusions de type gauche/droit et l’erreur angulaire sont significativement plus élevés pour l’alarme tonale que pour les alarmes multi-tonale et large-bande (environ 8% plus élevé pour le pourcentage d’erreur et environ 9° plus élevé pour l’erreur angulaire, dans les deux cas), alors que les deux mesures dépendantes sont similaires pour ces deux dernières alarmes et ce, avec et sans les coquilles.

Pour les conditions avec haut-parleurs sur le côté sans coquilles, le pourcentage de confusions de type avant/arrière et l’erreur angulaire moyenne sont significativement plus faibles (meilleures performances) pour l’alarme large-bande que pour les alarmes tonale et multi-tonale, ces deux dernières ayant des performances similaires. Les différences entre l’alarme large-bande et l’alarme tonale sont de l’ordre de 24,0 – 27,8% pour le pourcentage de confusion et 21,1-22,8°

pour l'erreur angulaire, alors que les différences entre l'alarme large-bande et l'alarme multi-tonale sont d'environ 33,7-37,8% pour le pourcentage de confusion et 27,6-30,4° pour l'erreur angulaire. Avec coquilles, le pourcentage de confusions avant/arrière est significativement plus élevé pour l'alarme multi-tonale que les alarmes large-bande et tonale, qui elles offrent des performances similaires. En ce qui concerne l'erreur angulaire, l'erreur moyenne est aussi significativement plus élevée pour l'alarme multi-tonale que les alarmes large-bande et tonale (qui sont similaires), mais seulement lorsque les haut-parleurs sont à la droite. Lorsque les haut-parleurs sont à la gauche, on note une erreur angulaire moyenne similaire pour les trois types d'alarmes.

H.4.3.2 Effet principal du facteur arrangement des haut-parleurs – coquilles

Un diagramme de comparaisons est présenté à la Figure 35 pour regarder l'effet principal du facteur d'arrangement des haut-parleurs.

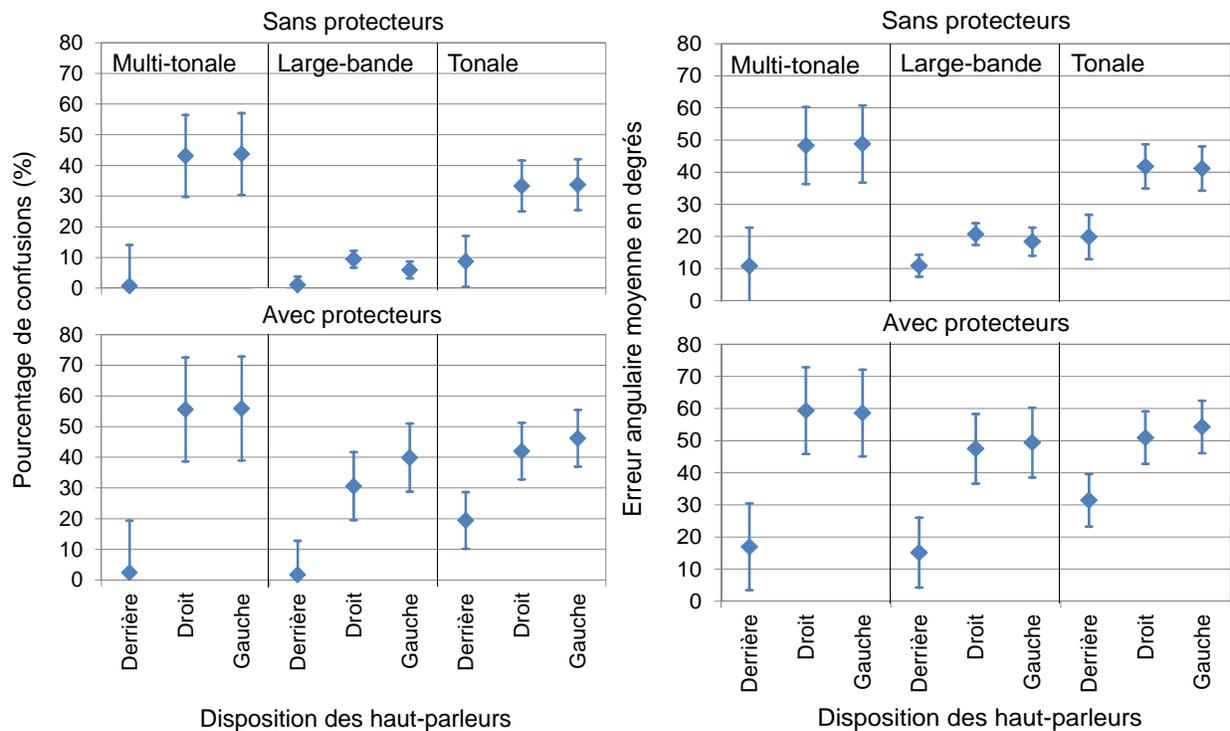


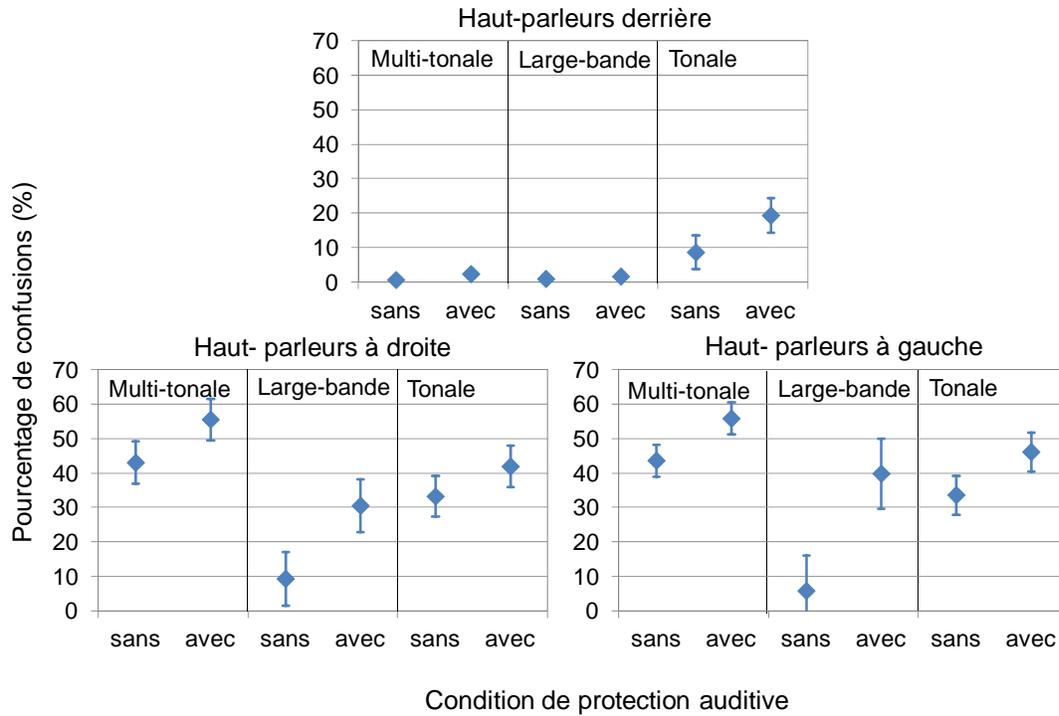
Figure 35 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l'erreur angulaire moyenne (figure de droite) dans les divers arrangements des haut-parleurs en ajustant les niveaux des facteurs alarme et port de protecteurs. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaison (chaque panneau).

Avec et sans coquilles, le pourcentage de confusions et l'erreur angulaire sont similaires pour les conditions avec les haut-parleurs à droite et à gauche, qui sont significativement plus élevés que le pourcentage de confusions (différences entre 22,6 et 53,5%) et l'erreur angulaire (différences entre 7,5 et 42,4°) obtenus dans la condition avec les haut-parleurs derrière et ce, peu importe le type d'alarme. Une seule exception est notée pour le pourcentage de confusions sans coquilles

avec l'alarme large-bande. Dans ce cas, seules les conditions avec les haut-parleurs derrière et à droite sont significativement différentes l'une de l'autre. Par contre, dans cette même condition (alarme large-bande sans coquilles), le pourcentage de confusions est très faible (inférieur à 10%).

H.4.3.3 Effet principal du facteur port de protecteurs auditifs – coquilles

Finalement, pour les coquilles, la Figure 36 présente les données pour l'effet principal du port des protecteurs auditifs.



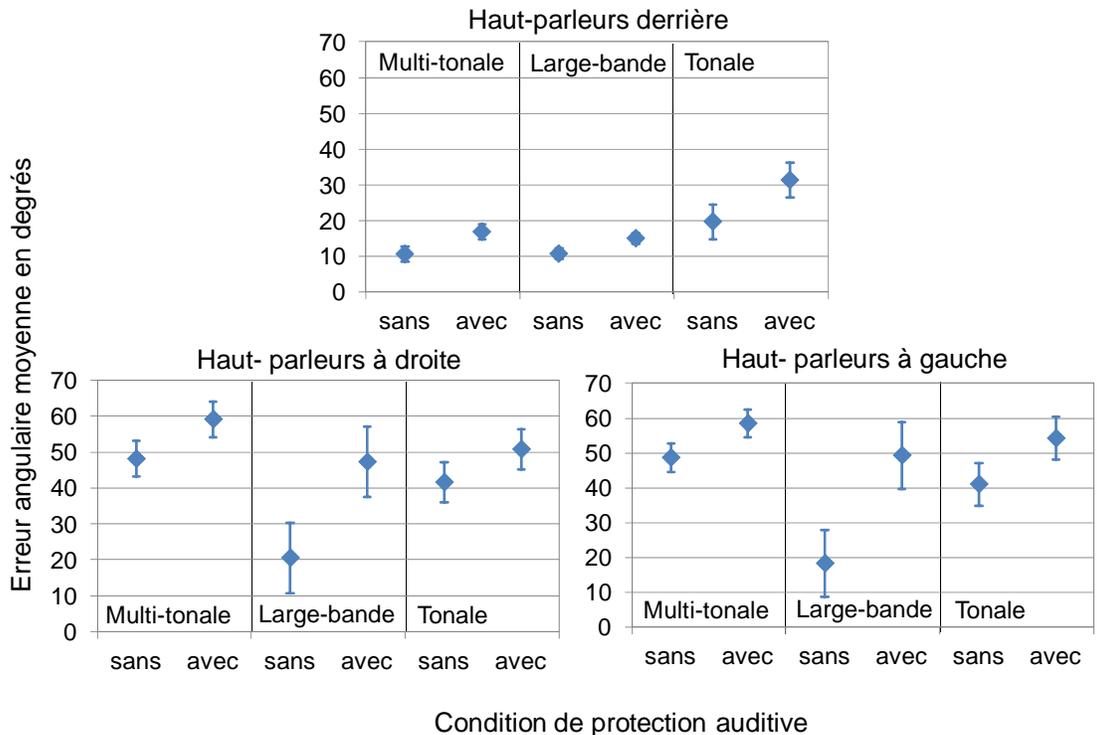


Figure 36 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure du haut) et de l'erreur angulaire moyenne (figure du bas) pour chaque condition du port de protecteurs auditifs en ajustant les niveaux des facteurs alarme et arrangement des haut-parleurs. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Lorsque les haut-parleurs sont derrière, le pourcentage de confusions de type gauche/droit ne semble pas être modifié par le port des coquilles comparativement à la condition sans protecteurs, sauf avec l'alarme tonale, et les performances sont généralement très bonnes sans et avec coquilles. Pour l'alarme tonale, les confusions sont significativement plus fréquentes (10,8% de plus) avec que sans les coquilles.

Lorsque les haut-parleurs sont de chaque côté, le pourcentage de confusions augmente de façon significative. Sauf pour l'alarme tonale lorsque les haut-parleurs sont à la droite, le pourcentage de confusions est plus faible sans coquilles qu'avec les coquilles, avec des différences de l'ordre de 13% pour les alarmes tonale et multi-tonale, et de l'ordre de 21 à 34% pour l'alarme large-bande.

En ce qui a trait à l'erreur angulaire moyenne, à l'exception de la condition avec les haut-parleurs à la droite et l'alarme tonale, l'erreur angulaire est toujours significativement plus grande avec les coquilles que sans coquilles, les différences étant plus grandes pour les haut-parleurs de côté (différences de 9,8 à 31,1°) que pour les haut-parleurs derrière (différences de 4,3 à 13,2°).

H.4.3.4 Effet principal du facteur alarme – bouchons

Puisqu’une interaction existe entre les facteurs intrasujets alarme et arrangement des haut-parleurs, nous devons ajuster le niveau de l’autre facteur dans la description de chacun des effets principaux. Un diagramme de comparaison (Figure 37) résume les résultats pour trois groupes de comparaisons possibles pour l’analyse du facteur alarme. Encore une fois, la statistique de type ANOVA de Ahmad et coll. (2008) a été utilisée pour estimer conjointement les différences entre les pourcentages moyens, avec un ajustement de Bonferroni pour contrôler le niveau de confiance des trois groupes de comparaison.

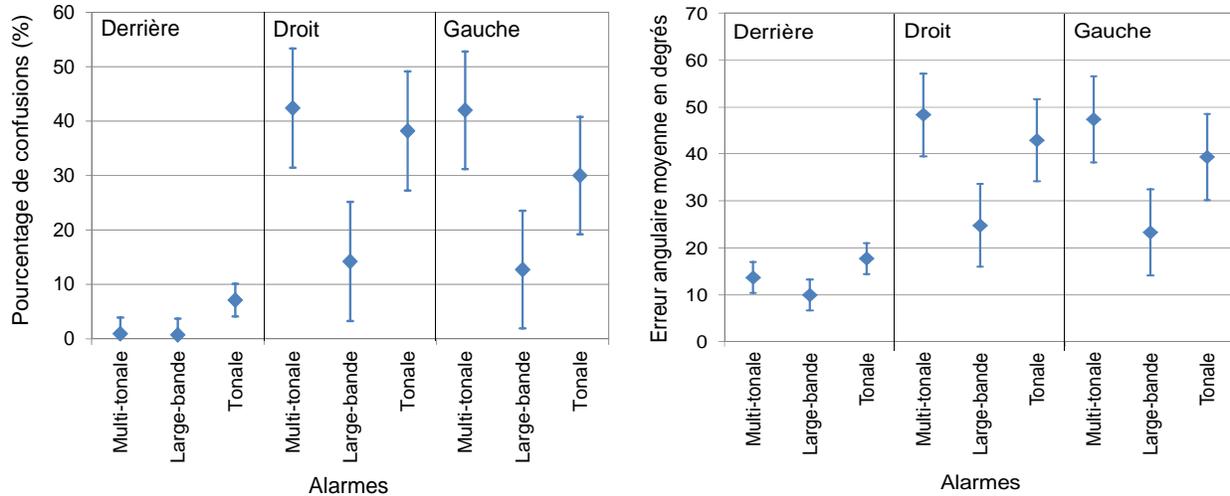


Figure 37 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l’erreur angulaire moyenne (figure de droite) des alarmes en ajustant les niveaux du facteur arrangement des haut-parleurs. Les barres d’erreur sont basées sur l’erreur maximale (+/- la moitié de l’erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaisons (chaque panneau individuel).

Pour la condition avec les haut-parleurs derrière, le pourcentage de confusions de type gauche/droit et l’erreur angulaire sont significativement plus élevés pour l’alarme tonale que pour l’alarme large-bande (environ 6% plus élevé pour le pourcentage d’erreur et environ 8° plus élevé pour l’erreur angulaire). Le pourcentage de confusions est également 6% plus élevé pour l’alarme tonale que pour l’alarme multi-tonale, alors que cette dernière a un pourcentage de confusions équivalent à celui de l’alarme large-bande.

Lorsque les haut-parleurs sont à la droite, le pourcentage de confusions de type avant/arrière et l’erreur angulaire moyenne sont significativement plus faibles (meilleures performances) pour l’alarme large-bande que pour les alarmes tonales et multi-tonales, ces deux dernières ayant des performances similaires. La différence entre l’alarme large-bande et l’alarme tonale est 24,0% pour le pourcentage de confusion et 18,2° pour l’erreur angulaire, alors que la différence entre l’alarme large-bande et l’alarme multi-tonale est 28,1% pour le pourcentage de confusion et 23,6° pour l’erreur angulaire.

Finalement, lorsque les haut-parleurs sont à la gauche, le pourcentage de confusion de type avant/arrière et l’erreur angulaire moyenne sont significativement plus élevés pour l’alarme

multi-tonale que pour l'alarme large-bande (différence de 29,3% pour le pourcentage de confusion et de 24,1° pour l'erreur angulaire), indiquant des performances de localisation plus pauvres alors que l'alarme large-bande a des performances similaires à l'alarme tonale.

H.4.3.5 Effet principal du facteur arrangement des haut-parleurs – bouchons

Un diagramme de comparaisons est présenté à la Figure 38 pour regarder l'effet principal du facteur d'arrangement des haut-parleurs, lorsque les niveaux du facteur alarme sont ajustés.

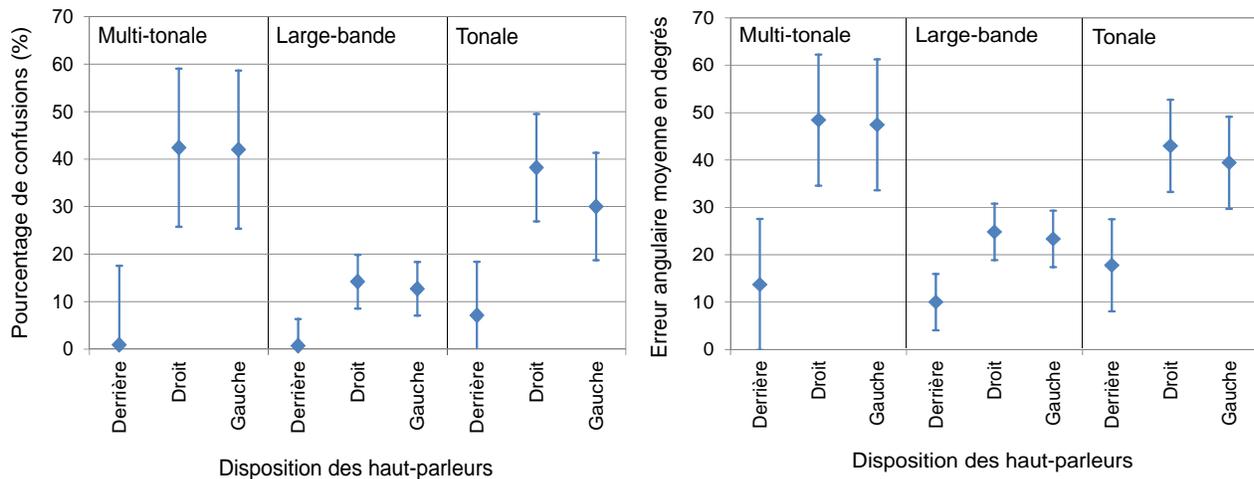


Figure 38 : Comparaison du pourcentage de confusions moyen (figure de gauche) et de l'erreur angulaire moyenne (figure de droite) pour les divers arrangements des haut-parleurs en ajustant les niveaux du facteur alarme. Les barres d'erreur sont basées sur l'erreur maximale (+/- la moitié de l'erreur maximale) de la différence dans chaque groupe de comparaison (chaque panneau individuel).

Pour toutes les alarmes, on note que le pourcentage de confusions et l'erreur angulaire moyenne sont similaires pour les conditions avec les haut-parleurs à droite et à gauche, qui sont significativement plus élevés que ceux obtenus dans la condition avec les haut-parleurs derrière. Les différences sont par ailleurs plus faibles pour l'alarme large-bande (12,0-13,5% et 13,3-14,8°) que pour les alarmes tonale (22,9-31,1% et 21,6-25,2°) et multi-tonale (41,1-41,5% et 33,7-34,7°).

H.4.3.6 Effet principal du facteur port de protecteurs auditifs – bouchons

Finalement, tel qu'indiqué plus haut, aucun effet significatif n'a été noté pour le facteur port de protecteurs auditifs, le pourcentage de confusion et l'erreur angulaire moyenne étant similaires avec et sans protecteurs auditifs (19,8% de confusion sans protection comparativement à 22,0% avec protection et erreur angulaire moyenne de 28,8° sans protection, comparativement à 30,7° avec protection). Il est par contre important de noter que dans le cas du pourcentage de confusions, la valeur P (0,06) s'approche du critère de signification de 0,05. En général, les bouchons ne sembleraient donc pas nuire à la localisation auditive, comparativement aux coquilles qui avaient un effet néfaste sur la localisation, particulièrement pour les conditions où les haut-parleurs étaient sur le côté.